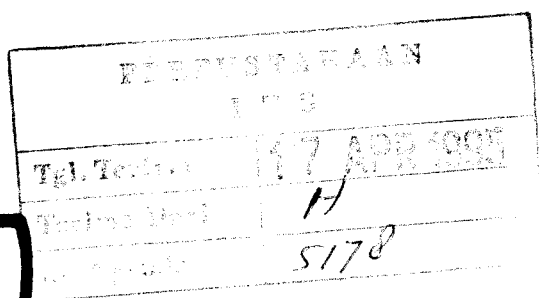
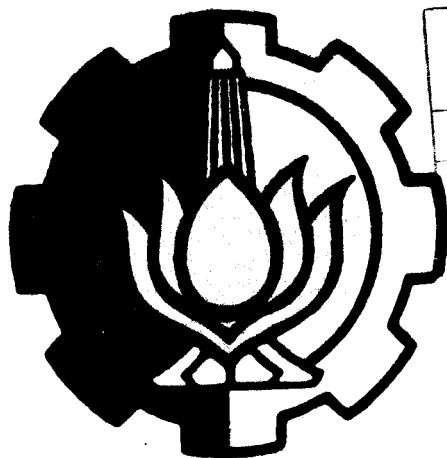


3100097008538

**STUDI**  
**PENGGUNAAN TEKNOLOGI FUSI NUKLIR**  
**DENGAN REAKSI D-T DAN D-D DARI AIR LAUT**  
**DAN KEMUNGKINAN PENERAPANNYA DI INDONESIA**



RSE  
621.484  
Pra  
S-1  
1995

Disusun oleh :  
**MULYO PRASETYO**  

---

NRP. 2882201119

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**  
**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA**  
**1995**

**STUDI**  
**PENGUNAAN TEKNOLOGI FUSI NUKLIR**  
**DENGAN REAKSI D-T DAN D-D DARI AIR LAUT**  
**DAN KEMUNGKINAN PENERAPANNYA DI INDONESIA**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan**

**Untuk Memperoleh Gelar**

**Sarjana Teknik Elektro**

**P a d a**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga**

**Jurusan Teknik Elektro**

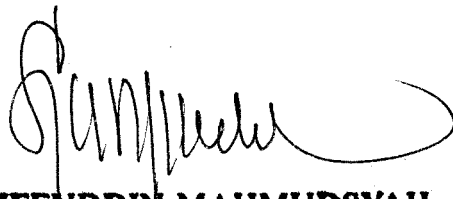
**Fakultas Teknologi Industri**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**S u r a b a y a**

**Mengetahui / Menyetujui**

**Dosen Pembimbing,**



**Ir. SYARIFFUDDIN MAHMUDSYAH, M.Eng.**

**S U R A B A Y A**

**MARET, 1995**

**" Jikalau bukan Tuhan**

**yang membangun rumah, sia-sialah**

**usaha orang yang membangunnya;**

**jikalau bukan Tuhan yang mengawal kota,**

**sia-sialah pengawal berjaga-jaga "**

**( Mazmur 127 : 1 )**

## **ABSTRAK**

*Dalam era pertumbuhan kebutuhan energi listrik yang cepat dan tingkat keandalan sistem tenaga listrik yang tinggi sekarang ini, ditambah dengan masalah lingkungan yang harus lebih diperhatikan, pengoperasian dan perencanaan sistem tenaga listrik masa yang akan datang menjadi semakin rumit.*

*Penggunaan teknologi maju ( advance technology ) di Indonesia, dalam menjawab tantangan peningkatan kebutuhan tenaga listrik yang semakin cepat, sudah menjadi keharusan untuk mendapat energi listrik yang berkualitas dengan memperhatikan kepada sumber energi primer yang tersedia serta beberapa aspek persyaratan yang ada. Layak teknis, ekonomis dan layak lingkungan adalah persyaratan yang harus dipertimbangkan dalam penerapan suatu teknologi di masa yang akan datang.*

*Teknologi fusi nuklir adalah salah satu teknologi masa depan yang menjadi harapan dunia untuk mendapatkan energi tanpa menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Teknologi ini adalah reaksi antara deuterium dan tritium (D-T), juga antara deuterium dengan deuterium (D-D) yang dapat dihasilkan dari air laut. Disamping sumber energi primer banyak yang tersedia, resiko yang mungkin timbul juga lebih kecil dibanding pembangkit lain yang telah ada sekarang ini.*

# KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan syukur kehadiran Tuhan Yang MAha Esa atas segala rahmat dan karunianya, akhirnya kami telah berhasil menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul :

## **STUDI PENGGUNAAN TEKNOLOGI FUSI NUKLIR DENGAN REAKSI D-T DAN D-D DARI AIR LAUT DAN KEMUNGKINAN PENERAPANNYA DI INDONESIA**

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan akademis dalam menyelesaikan pendidikan program Sarjana pada Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dengan menyadari akan keterbatasan yang ada dalam penulisan ini, penyusun berharap semoga tugas akhir dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Februari 1995

Penyusun

## UCAPAN TERIMA KASIH

Buku Tugas Akhir ini taidak akan dapat selesai tanpa bantuan dan kerja sama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang besar kepada :

1. Ir. Syariffuddin M., M. Eng., selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu dan pikiran untuk membimbing dan mengarahkan kami dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Dr. Budi Santoso, selaku Kepala Pusat Pengkajian Teknologi Nuklir - PPKTN - Badan Tenaga Atom Nasional, yang telah banyak memberi petunjuk dan informasi yang sangat berguna dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Seluruh rekan-rekan dan pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu disini, yang telah banyak memberi bantuan berupa saran, petunjuk serta dorongan moril yang sangat membantu hingga terselesaikannya tugas akhir ini.

# DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH .....	v
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi

## BAB I PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang .....	1
I.2. Pembatasan Masalah .....	3
I.3. Metodologi Pembahasan .....	4
I.4. Tujuan dan Relevansi .....	5

## BAB II ENERGI LISTRIK DI INDONESIA DAN PERMASALAHANNYA

II.1. Konsumsi Energi Nasional .....	7
II.1.1. Pertumbuhan Penduduk dan Sektor Ekonomi .....	7
II.1.2. Kebutuhan Energi Primer .....	8

II.2. Keadaan Kelistrikan Nasional .....	9
II.3. Kebutuhan Nergi Listrik Di Masa Mendatang .....	11
II.4. Potensi Sumber Energi Primer Nasional .....	13
II.4.1. Potensi Sumber Daya Energi Konvensional .....	13
II.4.2. Potensi Sumber Daya Energi Fusi Nuklir .....	16

### BAB III TEKNOLOGI FUSI NUKLIR ( FUSION NUCLEAR TECHNOLOGY )

III.1. Reaksi Fusi Nuklir .....	24
III.2. Pemanasan Plasma .....	27
III.3. Pengurungan Plasma .....	29
III.3.1. Magnetic Confinement .....	31
III.3.2. Inertial Confinement .....	35
III.4. Kerapatan Plasma dan Selang Waktu Pengurungan .....	37
III.5. Bahan Bakar Fusi Nuklir .....	39
III.5.1. Deuterium .....	39
III.5.2. Tritium .....	41
III.6. Penerapan Teknologi Fusi Nuklir Pada Pusat Pembangkit Listrik .....	43
III.6.1. Pusat Listrik Fusi Nuklir Dengan Reaktor Magnetik .....	46
III.6.2. Pusat Listrik Tenaga Fusi Laser .....	47
III.6.3. Pusat Listrik Tenaga Fusi Dengan Binary Vapor Cycle .....	48



## **BAB IV ANALISA EKONOMI DAN LINGKUNGAN**

### **TEKNOLOGI FUSI NUKLIR UNTUK PUSAT**

#### **PEMBANGKIT DI INDONESIA**

IV.1. Biaya Sistem Pembangkit .....	51
IV.1.1. Metode Pembandingan Biaya .....	53
IV.1.2. Prinsip Biaya Terendah .....	56
IV.2. Analisa Ekonomi Teknologi Fusi Nuklir Untuk Pusat Pembangkit .....	57
IV.2.1. Biaya Modal .....	58
IV.2.2. Biaya Operasi dan Perawatan .....	61
IV.2.3. Biaya Bahan Bakar .....	62
IV.2.4. Biaya Pembangkitan Total Sistem Pembangkit Fusi Nuklir dan Pembangkit Lainnya .....	63
IV.3. Dampak Lingkungan Penerapan Teknologi Fusi Nuklir Untuk Pusat Pembangkit .....	72

## **BAB V PENUTUP**

V.1. Kesimpulan .....	75
V.2. Saran - saran .....	77

DAFTAR PUSTAKA .....	78
----------------------	----

# DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2.1	Grafik Pemakaian Energi Selama PJP - I .....	9
GAMBAR 2.2	Proyeksi Kebutuhan Listrik Nasional di Masa Yang Akan Datang .....	12
GAMBAR 2.3	Komposisi Sumber Energi Listrik Pada Tahun 1991	20
GAMBAR 2.4	Komposisi Sumber Energi Listrik Pada Tahun 2021	20
GAMBAR 3.1	Proses Fusi Antara Tritium Dan Deuterium .....	23
GAMBAR 3.2	Ohmic Heating Untuk Plasma Dengan Arus Induksi	28
GAMBAR 3.3	Arah Gerakan Partikel Tanpa Medan Magnet .....	30
GAMBAR 3.4	Gerakan Partikel Plasma Dalam Medan Magnet ...	31
GAMBAR 3.5	Magnetic Pinch Confinement .....	32
GAMBAR 3.6	Skema Sederhana Magnetic Mirror Confinement ..	33
GAMBAR 3.7	Confinement By Closed Geometry .....	34
GAMBAR 3.8	Stellarator .....	35
GAMBAR 3.9	Prinsip Kerja Fusi Laser .....	36
GAMBAR 3.10	Cross Section Reaksi Pembentukan Tritium .....	42
GAMBAR 3.11	Rencana Pengembangan Teknologi Fusi Menurut ANS .....	44
GAMBAR 3.12	Jumlah Neutron Hasil Penembakan Sinar Laser ..	45

GAMBAR 3.13	Prinsip Kerja ( Thermal ) Puembangkit Fusi	
	Dengan Magnetic Confinement .....	46
GAMBAR 3.14	Prinsip Kerja ( Thermal ) Pembangkit Fusi	
	Dengan Fusi Laser .....	46
GAMBAR 3.15	Skema Prinsip Kerja Pembangkit Fusi Dengan	
	Binary Vapor Cycle .....	50
GAMBAR 4.1	Penggolongan Biaya-biaya Teknologi Pembangkit	
	Tenaga Listrik .....	52
GAMBAR 4.2	Perbandingan Biaya Pembangkitan Total	
	Dari Beberapa Pembangkit .....	55
GAMBAR 4.3	Perbandingan Biaya Pembangkitan Total Dari Beberapa	
	Pembangkit Dengan Discount Rate Berbeda-beda ..	67
GAMBAR 4.4	Perbandingan Biaya Pembangkitan Total Dari Beberapa	
	Pembangkit Dengan Kenaikan Harga Bahan Bakar ..	55

## DAFTAR TABEL

TABEL 2.1	Jumlah Penduduk, PDB dan Konsumsi Energi Di Indonesia Pada tahun 1981 - 1990 .....	7
TABEL 2.2	Pemakaian Energi Selama PJP - I .....	8
TABEL 2.3	Kapasitas Terpasang Pembangkit Tenaga Listrik Menurut Jenis Pembangkit Selama PJP - I .....	10
TABEL 2.4	Kapasitas Terpasang Pembangkit Tenaga Listrik Menurut Jenis Energi Selama PJP - I .....	10
TABEL 2.5	Proyeksi Kebutuhan Tenaga Listrik Nasional sampai Tahun 2021 .....	12
TABEL 2.6	Potensi Sumber Energi Primer Di Indonesia .....	15
TABEL 2.7	Potensi Sumber Energi Dunia .....	16
TABEL 2.8	Proyeksi Kapasitas Pembangkit Listrik Di Indonesia ..	18
TABEL 3.1	Energi Dalam Reaksi Fusi .....	25
TABEL 3.2	Kadar Deuterium Dalam Air Di Berbagai Tempat ...	40
TABEL 3.3	Perkembangan Reaktor Fusi Magnetik ( Tokamak ) ..	44
TABEL 3.4	Reaktor Fusi Magnetik ( Tokamak ) Di Dunia .....	45
TABEL 4.1	Cara Pendekatan Dasar Untuk Perhitungan Biaya Pembangkit Tenaga Listrik .....	54

TABEL 4.2	Komposisi Penyusun Total Biaya Pembangkitan . . .	57
TABEL 4.3	Data Beberapa Pembangkit . . . . .	58
TABEL 4.4	Struktur Biaya Modal Pembangkit Listrik Tenaga Fusi Nuklir . . . . .	59
TABEL 4.5	Perbandingan Biaya Pembangkitan Beberapa Pembangkit Dengan Discount Rate Yang Berbeda . . . . .	67

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1. LATAR BELAKANG

Sasaran utama Pembangunan Jangka Panjang Bangsa Indonesia dititikberatkan pada pembangunan di bidang ekonomi dengan pengembangan industri nasional yang lebih giat dan maju serta didukung oleh pertanian yang tangguh, sehingga tercipta landasan yang kuat bagi bangsa Indonesia untuk tumbuh dan berkembang atas kekuatan sendiri dalam menuju masyarakat yang adil dan makmur berdasarkan Pancasila.

Konsekuensi dari pengembangan industri nasional adalah diperlukannya penyediaan sumber energi dalam jumlah yang cukup besar di masa yang akan datang. Dan pertumbuhan pembangunan harus dilandasi pula azas pemerataan dan tetap dapat menjamin prinsip pembangunan yang berkesinambungan.

Meskipun sumber daya energi cukup tersedia sebagai kekayaan alam, akan tetapi untuk menyediakannya sebagai sumber energi yang siap digunakan dalam mutu dan jumlah yang memadai tidaklah mudah. Dengan demikian tantangannya adalah mempertahankan dan meningkatkan upaya agar kebutuhan energi yang meningkat baik bagi kehidupan masyarakat maupun bagi kegiatan ekonomi senantiasa dapat terpenuhi.

Dalam hal ini pemerintah Indonesia telah mengambil kebijaksanaan untuk mengurangi secara strategis konsumsi minyak bumi dalam negeri yang semakin menipis, yaitu dengan mengembangkan energi pengganti melalui diversifikasi maupun konservasi energi dengan memperhatikan sumber daya alam dan sumber daya lainnya yang diperlukan untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan seperti sumber daya manusia, modal dan teknologi yang dikuasai.

Dalam sektor tenaga listrik terjadi pertumbuhan yang pesat selama Pembangunan Jangka Panjang Pertama yaitu kapasitas terpasang yang mencapai 13.127,7 MW dari 541,5MW pada tahun awal Pelita I atau tingkat pertumbuhan sekitar 14% sampai 17% pertahun dengan sebesar 6.470,5 MW atau sekitar 49% dari total kapasitas terpasang berasal dari minyak bumi. Dengan makin pesatnya pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik sudah menjadi keharusan bagi kita untuk mencari energi alternatif bagi pembangkit tenaga listrik mengingat cadangan minyak bumi yang kita miliki semakin menipis.

Pemilihan alternatif pembangkit listrik harus dipertimbangkan dari beberapa aspek antara lain aspek ketersediaan energi, aspek ekonomis, aspek teknis dan aspek lingkungan. Energi dari batubara dan nuklir menjadi energi alternatif bagi pembangkit di masa yang akan datang. Akan tetapi penggunaan batubara secara besar-besaran menimbulkan ancaman bagi lingkungan yaitu dengan timbulnya hujan asam dan efek pemanasan global yang sangat mencemaskan para ahli lingkungan dewasa ini. Energi nuklir yang relatif murah memiliki resiko yang mengkhawatirkan dalam penggunaannya, terutama setelah kejadian kecelakaan di

Chernobil ( Rusia ) dan Three Mile Island ( Amerika Serikat ). Oleh karena itu penggunaan teknologi maju ( advance technology ) di Indonesia sudah menjadi keharusan untuk mendapatkan energi yang berkualitas dengan memperhatikan kepada sumber energi primer yang tersedia dan kemampuan yang ada.

Energi yang diperoleh dari fusi nuklir ( *nuclear fusion* ) dapat menjadi energi alternatif bagi pembangkit di masa yang akan datang. Energi ini diperoleh dari reaksi antara Deuterium dengan Deuterium atau dikenal dengan reaksi D-D juga dari reaksi antara Deuterium dengan Tritium atau D-T yang dapat diperoleh dari air laut. Atas dasar pertimbangan bahwa teknologi fusi nuklir memiliki sumber yang banyak tersedia, lebih aman dan lebih bersih dalam arti tidak menimbulkan efek negatif bagi lingkungan, maka teknologi ini kiranya suatu solusi yang tepat dalam usaha pemenuhan kebutuhan tenaga listrik di masa yang akan datang.

## 1.2. PEMBATAAN MASALAH

Sesuai tuntutan dari kebutuhan listrik yang makin meningkat di masa mendatang dan aspek lingkungan yang harus lebih diperhatikan, pengkajian teknologi fusi nuklir di Indonesia bagi pusat pembangkit listrik untuk masa yang akan datang hendaknya dimulai sejak dini.

Untuk itu perlu diketahui performa atau unjuk kerja dari pembangkit listrik tenaga fusi nuklir dibandingkan dengan pembangkit lain. Unjuk kerja ini meliputi kelayakan teknis, kelayakan ekonomis serta kelayakan lingkungan yang merupakan tiga syarat utama dalam pengembangan pembangkit untuk masa yang akan datang.



Dalam tugas akhir ini tidak akan membahas secara khusus teknologi fusi nuklir itu sendiri akan tetapi memberi gambaran secara umum teknologi fusi nuklir dan penggunaannya dalam pembangkitan tenaga listrik tersebut ditinjau dari segi teknis atau efisiensi dan yang terakhir dari segi dampaknya terhadap lingkungan.

Hal lain yang juga dibahas adalah prospek penerapan teknologi fusi nuklir di Indonesia dalam rangka penyediaan energi listrik masa depan yang berwawasan lingkungan.

### I.3. METODOLOGI PEMBAHASAN

Untuk mencapai tujuan studi di atas, perlu disusun metodologi pendekatan studi yang digunakan sebagai pedoman pembahasan. Adapun metodologi pendekatan studi yang dipakai adalah :

1. Mempelajari perkembangan ketenagalistrikan di Indonesia dan permasalahannya serta rencana pengembangan pembangkit di masa datang khususnya dalam penggunaan teknologi fusi nuklir dalam pembangkit tenaga listrik.
2. Mempelajari perkembangan teknologi fusi nuklir dan jenis pembangkit listrik tenaga fusi untuk masa yang akan datang.
3. Melakukan analisa kemungkinan penerapan teknologi fusi nuklir untuk pusat pembangkit di masa mendatang dengan memperhitungkan aspek ekonomis dan lingkungan.

#### **I.4. TUJUAN DAN RELEVANSI**

Tujuan dari studi ini adalah untuk memberi gambaran dari penerapan teknologi fusi nuklir bagi pembangkit tenaga listrik untuk masa yang akan datang ditinjau dari segi teknis, ekonomis serta segi lingkungan dan untuk selanjutnya dapat dikaji dan diterapkan di Indonesia.

Dengan adanya studi ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam pengembangan alternatif teknologi ketenagalistrikan di Indonesia untuk masa mendatang agar diperoleh hasil yang optimal secara teknis dan dalam wawasan lingkungan.

## BAB II

# ENERGI LISTRIK DI INDONESIA DAN PERMASALAHANNYA

Sampai saat ini pembangunan perekonomian di Indonesia yang bertujuan untuk kemakmuran masyarakat terus meningkat dengan cepat. Sejalan dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan dan tingkat perekonomian, kebutuhan akan energi juga berkembang.

Energi dipergunakan sebagai penggerak pembangunan ekonomi untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat serta penjamin kestabilan nasional. Dengan demikian energi merupakan komponen penting bagi tercapainya tujuan nasional bangsa Indonesia. Karena itu, dalam usaha pemanfaatan energi harus berpedoman pada tujuan untuk mencapai kemakmuran rakyat, kemandirian bangsa Indonesia serta berwawasan lingkungan.

Peranan energi dalam pembangunan di Indonesia adalah sebagai sumber dana pembangunan dan untuk memenuhi kebutuhan energi dalam negeri. Sehingga dalam penyediaannya harus memperhitungkan banyak aspek yaitu menyediakan energi dalam jumlah yang mencukupi dengan harga terjangkau, andal, aman terhadap lingkungan dan hemat devisa dengan memanfaatkan sumber daya dalam negeri seoptimal mungkin.

## II.1. PEMAKAIAN ENERGI DI INDONESIA

### II.1.1. Pertumbuhan Penduduk dan Sektor Ekonomi

Pertumbuhan penduduk dan ekonomi merupakan faktor yang sangat mempengaruhi pertumbuhan konsumsi energi. Pengaruh langsung dari pertumbuhan penduduk terhadap pertumbuhan konsumsi energi adalah dengan bertambahnya jumlah penduduk akan meningkatkan kebutuhan energi untuk memasak, penerangan, transportasi dan lain-lain.

Tabel 2.1 menunjukkan pertumbuhan jumlah penduduk, ekonomi dan konsumsi energi di Indonesia selama dasawarsa terakhir ( tahun 1981 - 1990 ). Pertumbuhan penduduk rata-rata selama sepuluh tahun tersebut adalah 2,13 % per tahun, sedang pertumbuhan Produk Domestik Bruto ( PDB ) adalah sebesar 6,09 % per tahun. Dalam periode 1981 - 1990 pertumbuhan konsumsi energi adalah sebesar 6,19 % per tahun, yang lebih besar daripada pertumbuhan sektor ekonomi.

TABEL 2.1  
JUMLAH PENDUDUK, PDB DAN KONSUMSI ENERGI INDONESIA  
TAHUN 1981 - 1990

Tahun	Jumlah Penduduk		P D B		Konsumsi Energi	
	Juta (Jws)	Pertumbuhan (%)	Milyar (Rp.)	Pertumbuhan (%)	Juta (BOE)	Pertumbuhan (%)
1981	149,7	-	66,85	-	204,4	-
1982	153,0	2,20	68,35	2,25	209,3	2,40
1983	156,3	2,16	73,70	7,82	216,8	3,58
1984	159,8	2,24	76,14	6,03	234,9	6,35
1985	163,0	2,00	79,91	2,26	248,1	5,62
1986	166,4	2,09	90,01	12,64	259,1	4,43
1987	170,0	2,16	94,52	5,00	276,0	6,52
1988	173,6	2,12	99,94	5,73	294,5	6,70
1989	177,2	2,07	107,32	7,39	320,9	8,96
1990	180,9	2,09	113,76	6,00	350,9	9,35

Sumber : Biro Pusat Statistik

Sebanyak 60 % dari total jumlah penduduk, bertempat tinggal di pulau Jawa yang luasnya hanya 8 % dari seluruh wilayah Indonesia dan 40 % sisanya tersebar di pulau-pulau yang lain. Dengan demikian kepadatan penduduk pulau Jawa jauh lebih tinggi daripada kepadatan penduduk pulau lainnya.

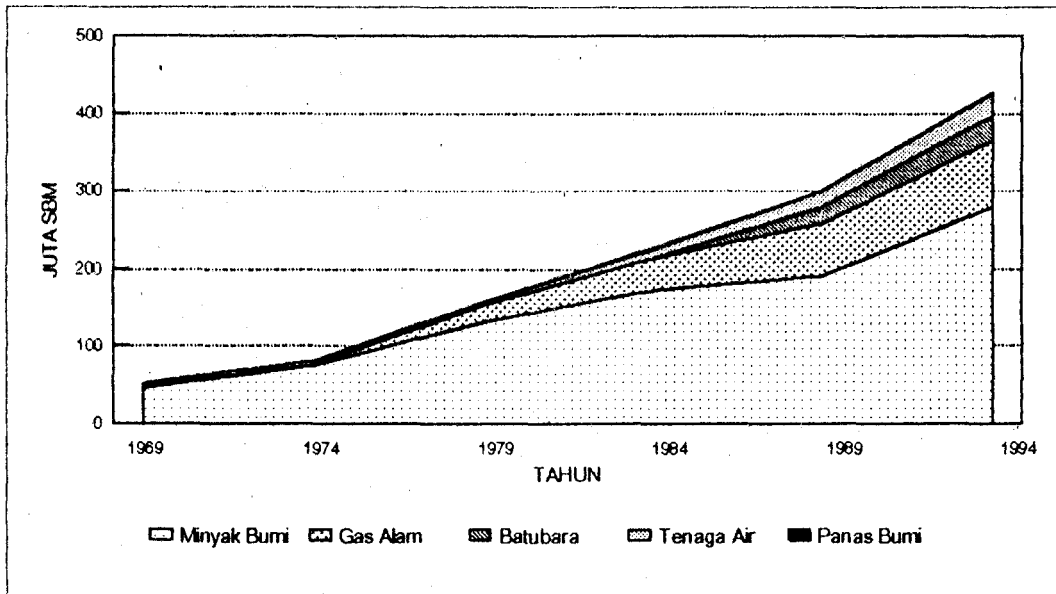
### II.1.2. Kebutuhan Energi Primer

Sejalan dengan meningkatnya laju pembangunan dan pertambahan jumlah penduduk, maka kebutuhan energi primer terus meningkat. Selama PJP - I, konsumsi energi di Indonesia meningkat sangat cepat, dari 50 juta SBM pada awal Pelita I menjadi 430 juta SBM pada tahun terakhir Pelita V. Rincian pemakaian energi primer selama dua dasawarsa terakhir disajikan pada tabel 2.2. Dari tabel tersebut terlihat bahwa laju konsumsi energi primer selama PJP - I di Indonesia sangat tinggi yaitu sebesar 9,41 % per tahun. Pangsa minyak bumi sebagai sumber energi primer masih dominan pada akhir PJP - I, yaitu sebesar 65%. Gambar 2.1 menunjukkan secara grafik konsumsi energi primer Indonesia selama PJP - I.

TABEL 2.2  
PEMAKAIAN ENERGI PRIMER SELAMA PJP - I

Tahun	JENIS ENERGI										(Juta SBM)	
	Minyak Bumi		Gas Alam		Batubara		Tenaga Air		Panas Bumi		Jumlah	Pertumbuhan (%)
	Kebutuhan	(%)	Kebutuhan	(%)	Kebutuhan	(%)	Kebutuhan	(%)	Kebutuhan	(%)		
1969	43,9	87,6	3,1	6,2	0,7	1,4	2,4	4,4	0,0	0,0	50,1	7,4
1974	70,6	91,0	3,2	4,1	0,6	0,8	4,2	5,4	0,0	0,0	77,6	11,59
1979	129,9	83,4	20,7	13,3	0,7	0,5	3,8	2,4	0,0	0,0	155,2	15,27
1984	170,3	75,3	42,7	18,9	1,1	0,5	11,6	5,1	0,4	0,2	226,1	6,75
1989	190,2	63,0	69,9	23,1	19,9	6,6	20,2	6,7	2,0	0,7	302,1	6,1
1994	280,4	65,0	85,4	19,9	32,5	7,5	28,0	6,5	3,6	0,8	429,9	9,36

Sumber : Departemen Pertambangan dan Energi



GAMBAR 2.1

GRAFIK PEMAKAIAN ENERGI SELAMA PJP - I

## II.2. KEADAAN KETENAGALISTRIKAN NASIONAL

Pelaksanaan pembangunan sistem ketenagalistrikan selama PJP-I telah mengalami kemajuan pesat. Selama kurun waktu tersebut telah berhasil dibangun pusat-pusat pembangkit tenaga listrik sehingga daya terpasang di Indonesia telah berkembang dari 541,5 MW pada tahun awal Pelita I menjadi 13.127,7 MW pada akhir PJP-I seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.3.

Dari komposisi pada tabel 2.4 terdapat kecenderungan bahwa pangsa peranan minyak bumi dalam pembangkitan tenaga listrik nasional menurun dari sekitar 84,7 % pada Pelita II, menjadi 49,3 % pada akhir PJP-I. Sedang pangsa peran pembangkit non minyak bumi menunjukkan cenderung naik. Hal ini sejalan dengan kebijaksanaan diversifikasi di bidang energi, yaitu pengurangan

ketergantungan energi secara strategis pada minyak bumi untuk konsumsi dalam negeri dan menggantikannya dengan energi lain.

TABEL 2.3  
KAPASITAS TERPASANG PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK  
MENURUT JENIS PEMBANGKIT SELAMA PJP-I

Jenis Pembangkit	(MW)					
	1969/70	Akhir Pelita I 1973/74	Akhir Pelita II 1978/79	Akhir Pelita III 1983/84	Akhir Pelita IV 1988/89	Akhir Pelita V 1993/94
PLTA	184,80	278,70	351,00	536,40	1.969,60	2.215,00
PLTU	113,00	225,00	556,00	1.556,30	3.417,00	4.340,60
PLTD	201,70	230,31	499,40	784,30	1.769,70	2.143,00
PLTG	42,00	42,00	882,00	1.027,90	1.233,70	1.412,80
PLTGU	-	-	-	-	-	2.816,80
PLTP	-	-	-	30,00	140,00	199,50
<b>TOTAL</b>	<b>541,50</b>	<b>776,01</b>	<b>2.288,40</b>	<b>3.934,90</b>	<b>8.530,00</b>	<b>13.127,70</b>

Sumber : Departemen Pertambangan dan Energi

TABEL 2.4  
KAPASITAS TERPASANG PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK  
MENURUT JENIS ENERGI  
SELAMA PJP-I

	JENIS ENERGI					Total
	Tenaga Air	Batubara	Gas Alam	Panas Bumi	BBM	
Repelita I	278,7 (35,9%)	-	-	-	497,3 (64,1%)	776,0 (100 %)
Repelita II	351,0 (15,3%)	-	-	-	1.937,4 (84,7%)	2.288,4 (100 %)
Repelita III	536,4 (13,6%)	-	-	30,0 (0,8%)	3.368,5 (85,6%)	3934,9 (100 %)
Repelita IV	1.969,6 (23,1%)	1.330,7 (15,6%)	230,8 (2,7%)	140,0 (1,6%)	4.858,9 (57%)	8.530,0 (100 %)
Repelita V	2.215,0 (16,9%)	2.130,0 (16,2%)	2.112,7 (16,1%)	199,5 (1,5%)	6.470,5 (49,3%)	13.127,7 (100 %)

Sumber : Departemen Pertambangan dan Energi

Konsumsi tenaga listrik selama Pembangunan Nasional 25 tahun Pertama mengalami peningkatan dari 1.471 GWh pada tahun pertama PJP-I menjadi sebesar 41.674 GWh pada tahun terakhir Pelita V, atau terjadi peningkatan 28 kali lipat, dengan pertumbuhan rata-rata 15% per tahun sedang produksi listrik pada akhir PJP-I sebesar 50.120 GWh dengan pertumbuhan rata-rata 14,5 % per tahun.

### II.3. KEBUTUHAN ENERGI LISTRIK DI MASA MENDATANG

Kebutuhan energi listrik di masa yang akan datang dipengaruhi oleh pertumbuhan ekonomi, pertumbuhan penduduk, tingkat kesejahteraan masyarakat dan tingkat pemakaian energi di masa sebelumnya. Proyeksi kebutuhan energi listrik di Indonesia sampai tahun 2021 ditunjukkan pada tabel 2.5 dan gambar 2.2.

Tabel 2.5, menunjukkan bahwa dari tahun 1991 sampai tahun 2021, kebutuhan tenaga listrik di Indonesia diperkirakan meningkat dengan rata-rata 8,2 % per tahun, yaitu dari 51.980 GWh pada tahun 1991 menjadi 554.940 GWh pada tahun 2021.

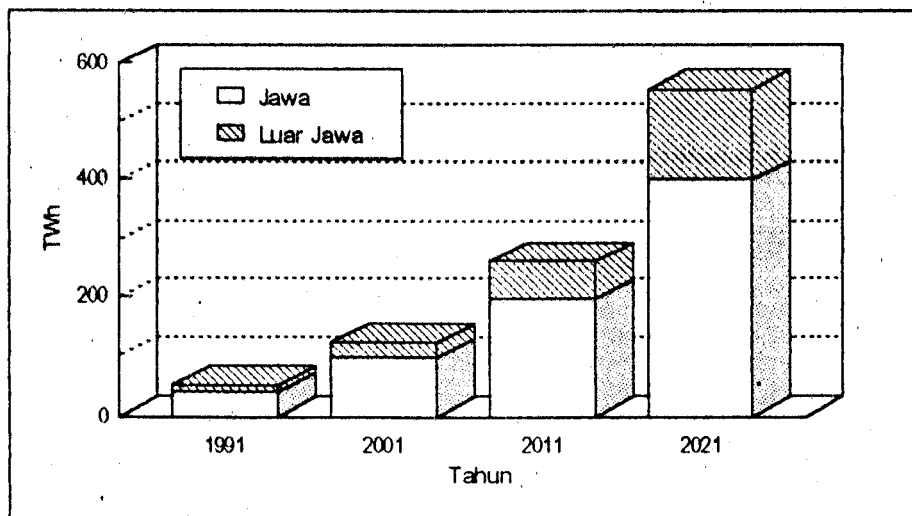
Pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik dari tahun 1991 sampai tahun 2001 sebesar 8,97 % per tahun. Pada periode 2001 - 2011 terjadi peningkatan sebesar 7,75 % setiap tahunnya. Dan dalam periode terakhir, yaitu dari tahun 2011 sampai tahun 2021 terjadi kenaikan sebesar 7,95 % per tahun.



TABEL 2.5  
PROYEKSI KEBUTUHAN TENAGA LISTRIK NASIONAL  
SAMPAI TAHUN 2021

No.	PLN	Kebutuhan	Unit	1991	2001	2011	2021
1.	Jawa	- Energi	( GWh )	41.356	96.666	195.952	399.659
		- Beban Puncak	( MW )	11.070	21.134	42.397	87.707
2.	Luar Jawa	- Energi	( GWh )	10.624	26.051	62.915	155.281
		- Beban Puncak	( MW )	9.290	14.041	21.193	44.763
3.	Total Indonesia	- Energi	( GWh )	51.980	122.717	258.867	554.940
		- Beban Puncak	( MW )	20.360	35.175	63.590	132.470

Sumber : BPPT - KFA, Studi Markal, Juli 1993



GAMBAR 2.2  
PROYEKSI KEBUTUHAN LISTRIK NASIONAL  
DI MASA YANG AKAN DATANG

Dari gambar 2.2 dapat kita lihat bahwa pangsa kebutuhan listrik pulau Jawa tetap lebih besar dibanding dengan wilayah luar Jawa. Dari tahun 1991

sampai tahun 2021, rata-rata pangsa konsumsi tenaga listrik pulau Jawa sebesar 76,51 % dari kebutuhan listrik nasional.

#### II.4. POTENSI SUMBER ENERGI PRIMER NASIONAL

Untuk menentukan strategi pengembangan pembangkitan yang akan datang dalam usaha pemenuhan kebutuhan tenaga listrik nasional yang berkesinambungan, tidak dapat terlepas dari sumber energi primer yang tersedia. Oleh karena itu, perlu kita tinjau potensi sumber energi yang kita miliki.

##### II.4.1. POTENSI SUMBER DAYA ENERGI KONVENSIONAL

Sumber energi minyak bumi untuk pemakaian dalam negeri khususnya sebagai bahan bakar pembangkit akan semakin berkurang. Hal ini dikarenakan cadangan terbukti minyak bumi yang semakin menipis dan sejalan dengan kebijaksanaan diversifikasi yaitu pengurangan ketergantungan strategis pada minyak bumi untuk konsumsi dalam negeri dan menggantikannya dengan jenis energi lain. Kebijakan diversifikasi akan meningkatkan keanekaragaman penggunaan berbagai jenis energi dengan memperhatikan aspek ekonomi guna meningkatkan kesejahteraan rakyat.

Dengan demikian minyak bumi akan lebih diutamakan sebagai bahan komoditi ekspor penghasil devisa negara, sebagai bahan baku industri tertentu dan sebagai bahan bakar untuk sektor yang tidak bisa mengelak dari penggunaan minyak bumi, misalnya pada sektor transportasi.

Prospek sumber daya energi primer yang berperan besar dalam pembangkitan tenaga listrik di masa yang akan datang adalah gas bumi, batu bara, panas bumi dan tenaga air. Potensi panas bumi di pulau Jawa adalah sebesar 50,5% dari 16.035 MW potensi nasional. Sebagian besar potensi tenaga air terdapat di luar pulau Jawa, yaitu sebesar 94,4% dari keseluruhan potensi tenaga air nasional sebesar 74.976 MW. Hanya 8,17% dari 109,1 Triliun CF potensi gas bumi nasional terdapat di pulau Jawa, sedang potensi batubara nasional seluruhnya berada di luar pulau Jawa, yaitu 15.808 juta ton di Sumatera dan 3.345 juta ton berada di Kalimantan. Tabel 2.6 menyajikan potensi sumber energi primer di Indonesia.

Dalam tabel 2.6 dapat kita ketahui bahwa sumber daya energi Indonesia berjumlah cukup banyak, namun distribusi lokasinya tidak seimbang dengan distribusi penduduk atau yang membutuhkan. Pulau Jawa yang merupakan pusat industri nasional dan merupakan pemakai 70 % dari produksi energi nasional, akan tetapi potensi sumber daya energi yang terletak di pulau Jawa kurang dari 10 % dari total potensi sumber daya energi nasional.

## II.4.2. POTENSI SUMBER ENERGI FUSI NUKLIR

Fusi nuklir merupakan potensi sumber daya energi baru yang dapat dipergunakan untuk menggantikan potensi sumber daya energi konvensional yang telah ada. Energi fusi nuklir adalah deuterium dan tritium, yang keduanya merupakan isotop dari hidrogen. Keberadaan bahan bakar tersebut, terutama deuterium, adalah hampir tidak terbatas jumlahnya. Tabel 2.7 menunjukkan perbandingan potensi sumber energi fosil, fisi nuklir dan fusi nuklir.

TABEL 2.7 <sup>2)</sup>  
POTENSI SUMBER ENERGI DI DUNIA

Jenis Energi	Bahan Bakar	Energi (Q)*
Fosil	Coal	32
	Minyak dan Gas Bumi	6
Fisi Nuklir	Uranium dan thorium	600
Fusi Nuklir	Deuterium (di lautan)	$10^{10}$

\*  $1 Q = 10^{18}$  Btu atau setara dengan  $10^{21}$  J

Tabel 2.7 menunjukkan bahan bakar fisi nuklir tersedia jauh lebih banyak ( hampir 20 kali ) dibanding persediaan bahan bakar fosil. Akan tetapi jika dibandingkan dengan besarnya potensi bahan bakar fusi nuklir (deuterium), persediaan uranium dan thorium adalah sangat terbatas.

Deuterium dapat kita peroleh dengan melakukan proses elektrolisa terhadap air berat ( $D_2O$ ) guna memisahkan atom deuterium dengan atom oksigen.

<sup>2)</sup> El-Wakil, Dr., Nuclear Energi Conversion, McGraw Hill, 1982, 2nd printing, Illinois - USA, hal. 518

Sedang air berat terkandung dalam air biasa dengan perbandingan dalam 6.500 bagian air biasa terdapat 1 bagian air berat atau dengan kata lain dalam setiap 30.000 kg air biasa terdapat 1 kg air berat.

Sedang bahan bakar lain, yaitu tritium, tidak dapat kita peroleh secara bebas di alam, akan tetapi diproduksi dari lithium yang merupakan unsur alam. Sedang lithium juga dapat kita peroleh dari air laut yang jumlahnya tidak terbatas di muka bumi ini.

## II.5. RENCANA PENGEMBANGAN PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK DI MASA YANG AKAN DATANG

Telah kita ketahui bahwa kebutuhan energi listrik Indonesia pada tahun 2021 diperkirakan akan mencapai 554.940 GWh dengan beban puncak sebesar 132.470 MW. Oleh karena itu diperlukan pengembangan sistem pembangkit nasional dalam rangka pemenuhan kebutuhan akan energi listrik yang berkesinambungan. Tabel 2.8 menyajikan rencana pengembangan ketenagalistrikan nasional di masa mendatang.

Untuk pembangkit listrik nuklir (PLTN) tidak termasuk dalam rencana pengembangan pembangkitan tersebut karena masih besarnya keresahan masyarakat akan keamanan teknologi tersebut. Oleh karena itu PLTN merupakan pilihan terakhir dari alternatif pembangkit yang akan dikembangkan.

TABEL 2.8  
PROYEKSI KAPASITAS PEMBANGKIT LISTRIK  
DI INDONESIA

JENIS PEMBANGKIT	TAHUN			
	1991 (GW)	2001 (GW)	2011 (GW)	2021 (GW)
<b>Wilayah Jawa</b>				
PLTU Batubara	1,56	4,19	3,39	0,84
PLTU Batubara *	0,00	5,43	29,09	69,25
PLTU Minyak	1,87	1,78	0,33	0,00
PLTU Gas	1,87	1,78	0,33	0,00
PLTGU	1,87	4,10	3,94	0,06
PLTG Minyak	1,87	4,10	3,94	0,06
PLT Gas	1,87	4,10	3,94	0,00
PLT Gas *	0,00	0,03	0,06	0,06
PLT Nuklir	0,00	0,00	0,00	0,00
PLT Panas Bumi	0,17	0,36	0,29	0,00
PLTA	1,99	3,12	3,12	3,27
PLT Diesel (captive)	4,57	3,07	5,36	20,51
Gas Turbin (field)	1,87	4,10	3,94	0,06
PLTU Biomassa	1,99	3,12	3,12	3,27
PLTA Minihidro	0,01	0,01	0,00	0,00
Sub Total	21,51	39,29	60,85	97,38
<b>Wilayah Luar Jawa</b>				
PLTU Batubara	0,20	0,56	4,90	16,95
PLTU Minyak	0,19	0,14	0,00	0,66
PLT Diesel	1,59	1,62	1,38	1,38
PLTU Gas	0,21	0,23	0,23	0,00
PLTGU	0,08	0,62	4,25	6,06
PLTG Minyak	0,33	0,34	0,27	9,73
PLT Gas	0,49	0,44	0,03	0,00
PLT Nuklir	0,00	0,00	0,00	0,00
PLT Panas Bumi	0,00	0,11	0,11	0,04
PLTA	0,87	4,84	7,70	7,70
PLT Diesel (captive)	4,75	4,19	1,52	1,52
Gas Turbin (field)	0,35	0,70	0,59	0,33
PLTU Biomassa	0,22	0,22	0,21	0,38
PLTA Minihidro	0,01	0,02	0,02	0,02
Sub Total	9,29	14,03	21,21	44,75
<b>TOTAL</b>	<b>30,80</b>	<b>53,32</b>	<b>82,06</b>	<b>142,13</b>

Sumber: BPPT - KFA, Studi Markal, Juli 1993

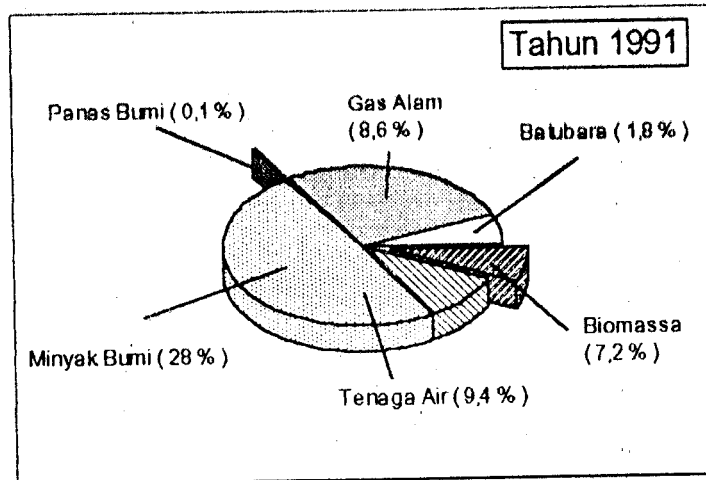
Dari tabel 2.8 terlihat bahwa peran pembangkit dengan bahan bakar batubara untuk seluruh wilayah Indonesia akan meningkat dari 1,76 GW ( 5,71 % ) pada tahun 1991 meningkat menjadi 87,04 GW ( 61,24 % ) pada tahun 2021.

Peran PLTGU meningkat dari 1,95 GW ( 6,33 % ) pada awal periode, meningkat menjadi 8,19 GW ( 9,98 % ) pada tahun 2011 dan akhirnya menurun menjadi 6,12 GW ( 4,31 % ) pada akhir tahun 2021. Hal ini disebabkan oleh karena makin berkurangnya sumber gas bumi pada akhir periode.

Peran tenaga air sebagai energi primer pembangkit tenaga listrik mengalami penurunan dari 9,4 % pada tahun 1991 menjadi 7,73 % pada tahun 2021. Hal ini disebabkan oleh padatnya penduduk pada masa itu sehingga pembangunan dam atau waduk yang membutuhkan lahan yang cukup luas, sulit dilaksanakan.

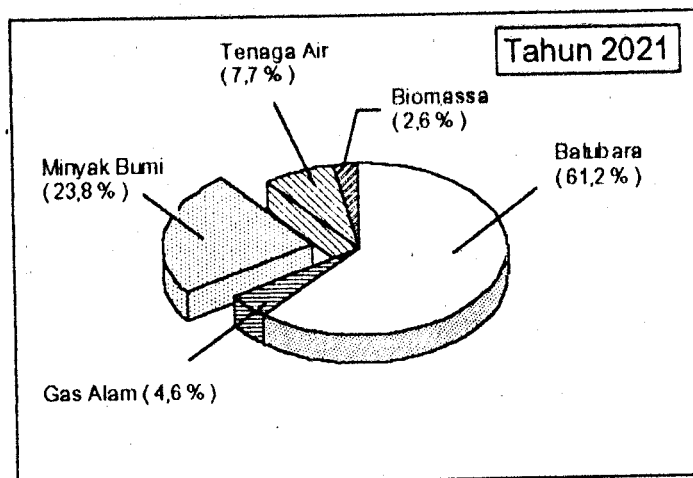
Peran panas bumi juga mengalami penurunan karena diperkirakan tidak diketemukannya sumber baru. Peran biomassa juga mengalami penurunan dalam pembangkitan listrik dari 7,18 % pada awal periode menjadi 2,57 % pada tahun 2021. Peranan batubara dalam ketenagalistrikan nasional meningkat pesat dari 5,71% pada awal periode menjadi 61,24 % pada akhir periode.

Pada tahun 2021, diperkirakan peranan gas alam akan menurun menjadi 4,62 % dari 27,95 % pada tahun 1991. Diperkirakan cadangan minyak bumi di Indonesia akan habis pada tahun 2007 dan mulai tahun 2008 Indonesia akan menjadi negara pengimpor minyak. Untuk pembangkit tenaga listrik, peran minyak bumi sebagai bahan bakar menjadi 23,81 % pada tahun 2021 dari 49,25 % pada tahun 1991. Komposisi sumber energi yang digunakan untuk pembangkit dapat dilihat pada gambar 2.3 dan gambar 2.4.



GAMBAR 2.3

KOMPOSISI SUMBER ENERGI PEMBANGKIT LISTRIK PADA TAHUN 1991



GAMBAR 2.4

KOMPOSISI SUMBER ENERGI PEMBANGKIT LISTRIK PADA TAHUN 2021

Telah kita ketahui bahwa pangsa konsumsi tenaga listrik untuk pulau Jawa, yang luasnya hanya 8 % dari luas wilayah nasional sedangkan tingkat kebutuhan



tenaga listrik pulau Jawa diperkirakan akan mencapai 399.659 GWh pada tahun 2021 atau 72 % dari seluruh kebutuhan energi listrik nasional, sehingga intensitas energi tiap km<sup>2</sup> pulau Jawa adalah sangat tinggi. Hal ini menimbulkan emisi polutan yang dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan di pulau Jawa.

Oleh karena itu, pemilihan teknologi pembangkit di masa mendatang perlu memperhitungkan beberapa aspek, antara lain aspek ekonomis, dampak lingkungan serta tersedianya bahan bakar. Adapun pilihan teknologi pembangkit bersih lingkungan yang akan dikembangkan di Indonesia antara lain PLTU - Batubara, PLT Gas Alam dan PLT Air.

Pusat Listrik Tenaga Air merupakan pembangkit yang sangat bersih. Pengembangan pembangkit tenaga air sangat bergantung dengan kondisi alam. Dampak lingkungan dari pengembangan pembangkit tenaga air adalah digunakannya lahan yang luas menjadi dam / waduk yang akan merubah ekosistem daerah yang digunakan.

Dampak lingkungan pengembangan pembangkit listrik tenaga batubara adalah timbulnya polusi udara akibat emisi SO<sub>x</sub> , NO<sub>x</sub> , CO<sub>2</sub> ,debu dan pertikel lainnya yang dapat berakibat buruk bagi kesehatan manusia dan lingkungan hidup. Pengembangan PLT Gas Alam berdampak terhadap lingkungan dengan adanya emisi CO<sub>2</sub> yang akan menimbulkan gangguan bagi lingkungan hidup.

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir dapat menjadi pilihan bagi pembangkit di masa mendatang. Dampak bagi lingkungan yang timbul akibat pengembangan pembangkit jenis ini adalah adanya limbah radioaktif yang berbahaya dan adanya

resiko kecelakaan seperti peristiwa Chernobyl - Rusia pada tahun 1986 dan di . .  
Three Miles Island - Amerika Serikat pada tahun 1979.

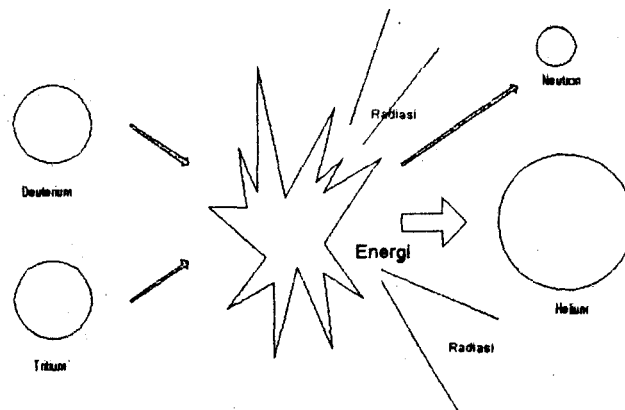
Teknologi pembangkit yang lain adalah teknologi fusi nuklir. Teknologi fusi nuklir menggunakan bahan bakar yang tersedia dalam jumlah yang berlimpah dan tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan seperti yang ditimbulkan pembangkit jenis lain. Oleh karena itu pembangkit listrik tenaga fusi nuklir merupakan pilihan yang tepat dari alternatif pembangkit yang akan dikembangkan di masa yang akan datang.

# BAB III

## TEKNOLOGI FUSI NUKLIR

### ( FUSION NUCLEAR TECHNOLOGY )

Bilamana pada proses fisi adalah terjadinya pemecahan inti atom menimbulkan sejumlah energi, maka proses fusi nuklir adalah penggabungan antara dua inti atom menjadi sebuah inti atom yang lebih besar sehingga menimbulkan sejumlah energi yang besar. Gambar 2.1 memperlihatkan proses fusi antara atom deuterium dengan atom tritium yang menghasilkan atom hidrogen dan sejumlah energi.

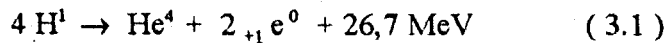


GAMBAR 3.1 <sup>3)</sup>  
PROSES FUSI ANTARA DEUTERIUM DAN TRITIUM

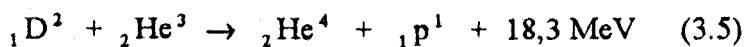
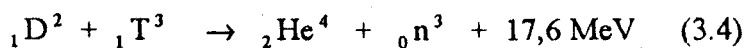
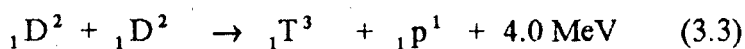
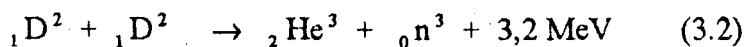
<sup>3)</sup> Abdul kadir, Prof. Ir., Energi, UI-Press, Cetakan - 3, 1990, hal. 362

### III.1. REAKSI FUSI NUKLIR

Sumber energi bagi matahari dan bintang di angkasa adalah reaksi fusi nuklir yang dihasilkan oleh empat inti atom hidrogen menjadi sebuah atom helium dan dua buah positron. Adapun reaksinya adalah sebagai berikut :



Reaksi fusi yang dilakukan di bumi dibuat dengan menggabungkan 2 atom ringan menjadi sebuah atom yang lebih berat. Adapun reaksi fusi yang telah dapat dilakukan hingga saat ini sebagai berikut :



Seperti terlihat pada persamaan (3.2) sampai (3.5) reaktan / bahan bakar dari reaksi fusi adalah deuterium ( ${}_1\text{D}^2$ ), tritium ( ${}_1\text{T}^3$ ) dan helium-3 ( ${}_2\text{He}^3$ ) sedangkan produk reaksi fusi antara lain partikel alpha ( ${}_2\text{He}^4$ ), neutron ( ${}_0\text{n}^1$ ), dan proton ( ${}_1\text{p}^1$ ) beserta sejumlah energi. Produk reaksi fusi tidak bersifat radioaktif setinggi produk reaksi fisi. Produk reaksi fusi yang bersifat radioaktif adalah hidrogen-3 atau tritium dan neutron. Tritium akan menjadi bahan bakar proses fusi berikutnya dan neutron segera akan meluluh menjadi atom hidrogen.

Masalah utama dari pembuatan reaksi fusi adalah kenyataan bahwa partikel-partikel yang bereaksi adalah inti yang bermuatan positif. Hal ini berarti

bahwa partikel-partikel reaksi tersebut harus memiliki energi kinetik yang cukup besar untuk mengatasi gaya tolak-menolak Coulomb. Untuk mendapatkan energi kinetik minimum yang diperlukan untuk menimbulkan reaksi fusi, kedua partikel reaksi harus memiliki angka perbandingan massa-muatan yang tinggi. Generasi pertama reaktor fusi nuklir menggunakan reaksi D-T, karena memiliki energi ambang yang paling rendah ( massa / muatan =  $5/2$  ) dan penguatan energi yang besar, seperti yang terlihat pada tabel 3.1.

TABEL 3.1 <sup>4)</sup>  
ENERGI DALAM REAKSI FUSI

	Energi Reaksi (MEV )	Energi Ambang Plasma ( keV )	Maksimum Penguatan Energi
D - T	17,6	10	1800
D - D	3,2	50	70
D - D	4,0	50	80
D - He	18,3	100	180

Keberadaan deuterium memungkinkan timbulnya reaksi D-D dan menghasilkan  ${}^3_2\text{He}$  yang akan bereaksi dengan deuterium dalam reaksi D-He<sup>3</sup>. Jadi pada akhirnya terdapat berbagai reaksi fusi dalam reaktor, yaitu reaksi D-T, reaksi D-D dan reaksi D-He<sup>3</sup>.

Diperlukan energi yang cukup besar ( puluhan keV ) untuk menimbulkan reaksi fusi nuklir untuk mengatasi gaya tolak menolak Coulomb antara dua buah inti atom positif yang harus saling bertabrakan lalu bergabung membentuk atom baru.

<sup>4)</sup> Ronald Allen Knief, Nuclear Energy Technology, McGraw-Hill, 1981, Illinois - USA, hal. 507

Besar energi yang dibutuhkan berkorelasi dengan kenaikan suhu sesuai persamaan 3.6, dimana  $k$  adalah konstanta Boltzmann yaitu sebesar  $8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$ .

$$E = k T \quad (3.6)$$

Berdasar persamaan 3.6, diperoleh bahwa 1 eV setara dengan temperatur  $1,16 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{K}$ , jadi 10 keV setara dengan temperatur lebih dari 100 juta  $^\circ\text{K}$ . Dalam keadaan ini, reaktan akan berwujud gas terionisasi sempurna yang disebut *plasma*.

Dalam wujud plasma, atom-atom reaktan terionisasi sempurna dimana inti atom dan elektron terpisah satu dengan yang lain, bersama-sama membentuk lautan atau awan partikel bermuatan. Oleh karena itu plasma bersifat sebagai konduktor listrik, berbeda dengan sifat gas yang pada umumnya merupakan isolator.

Reaksi fusi bertahan sendiri ( *sustained* ) dapat terjadi bila terpenuhi beberapa kondisi, yaitu :

1. Plasma berada pada suhu yang tinggi  $T$
2. Plasma memiliki kerapatan yang tinggi  $n$
3. Plasma dapat dipertahankan / dikurung dalam waktu yang cukup  $t$ .

Temperatur  $T$  menentukan besar energi rata-rata plasma dan jenis reaksi fusi yang dapat berlangsung. Besar energi dan kerapatan plasma menentukan rata-rata jumlah reaksi fusi yang berlangsung. Besar selang waktu mempertahankan / mengurung plasma serta rata-rata jumlah reaksi fusi yang berlangsung menentukan besar total energi output.

### III.2. PEMANASAN PLASMA

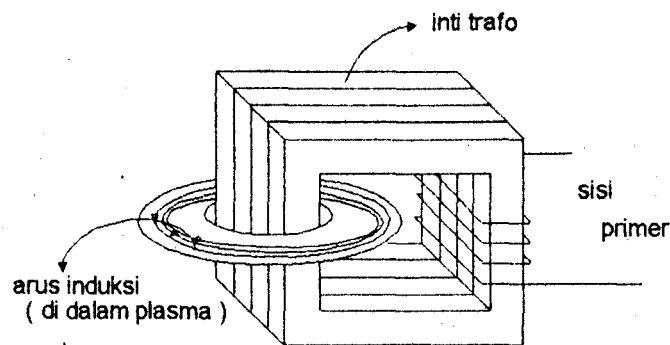
Pemanasan plasma ( *plasma heating* ) adalah proses menaikkan suhu plasma hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Proses ini dapat dilakukan dengan dua konsep. Konsep yang pertama adalah dengan memanaskan plasma 'dingin' yang sudah berada di dalam wadah penampungnya. Sedang konsep pemanasan plasma yang lain adalah dengan membuat partikel berenergi ( plasma ) dengan temperatur yang cukup di luar wadah lalu disuntikkan ke dalam wadah penampung.

Konsep pemanasan plasma pertama, yang dilakukan dengan memanaskan plasma dingin di dalam wadahnya, terdiri dari dua tahap. Tahap pertama adalah menaikkan suhu plasma hingga mencapai satu juta derajat Kelvin dengan menggunakan metode *ohmic heating*, yang pada prinsipnya sama dengan proses elemen pemanas biasa.

Dalam metode *ohmic heating*, proses pemanasan dilakukan dengan melewatkan arus listrik ke dalam plasma. Jadi, metode *ohmic heating* sangat bergantung pada besar tahanan listrik plasma. Untuk menghindari adanya elektroda terpasang di dalam plasma, digunakan arus induksi yang seperti yang terlihat pada gambar 3.2.

Pada temperatur di atas satu juta derajat K, metode *ohmic heating* tidak lagi dapat dipergunakan. Hal ini disebabkan oleh karena tahanan plasma menurun dan menjadi penghantar listrik. Untuk menaikkan suhu dalam proses selanjutnya, plasma diberi tekanan / kompresi magnetik dalam waktu yang cepat. Karena medan

magnet yang diterapkan memberi tekanan pada partikel plasma, peningkatan kuat medan yang mendadak mengakibatkan plasma terdesak dan suhunya meningkat. Analogi dari proses ini adalah meningkatnya suhu gas bila diberi tekanan dengan peralatan mekanis biasa seperti pompa atau kompresor. Untuk mencapai temperatur plasma yang sangat tinggi ( sekitar 100 juta  $^{\circ}\text{K}$  ), proses ini harus diulang sebanyak dua kali atau lebih.



GAMBAR 3.2

OHMIC HEATING UNTUK PLASMA DENGAN ARUS INDUKSI

Kategori kedua metode pemanasan plasma adalah dengan mempersiapkan partikel-partikel berenergi lalu disuntikkan ke dalam ke dalam wadah penampung. Untuk itu metode ini dapat dibagi atas dua tahap, yaitu proses *plasma injection* dan *particle injection*.

Proses *Plasma injection* ( penyuntikan plasma ) menggunakan alat yang dinamakan *plasma gun* untuk menghasilkan plasma bersuhu tinggi, yang kemudian disuntikkan ke dalam wadah penampung. Penyuntikan ini dapat dilakukan dengan menekan plasma menembus 'dinding' wadah atau dapat pula dengan



memasukkannya melalui *magnetic valve* ( katup magnetis ). *Magnetic valve* adalah bagian dari suatu medan magnet yang kuat medannya dapat meningkat kembali setelah plasma masuk ke dalamnya. Bagian kedua dalam metode ini dilakukan dengan menyuntikkan pancaran partikel dari luar ke dalam wadah penampung plasma. Dalam sebuah percobaan, molekul deuterium yang terionisasi disuntikkan dengan energi 600 keV ke dalam wadah penampung yang memiliki medan magnet. Di dalam wadah, molekul tersebut terpecah menjadi deuteron ( ion deuterium ) dan atom deuterium. Atom deuterium terlepas dari dalam wadah, tetapi deuteron positif terjebak di dalam wadah penampung.

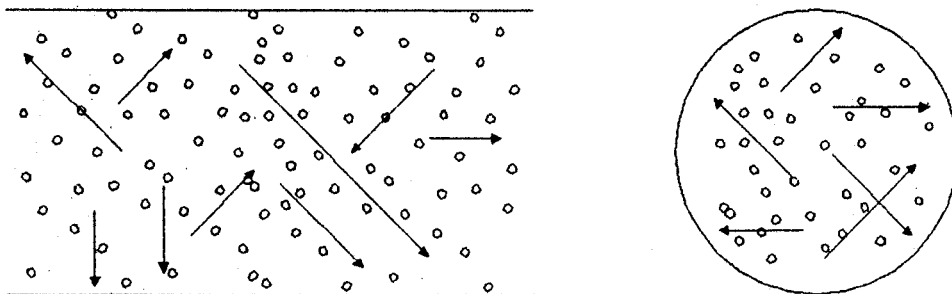
Pengembangan dari metode penyuntikan yang telah dipelajari di negara-negara maju, adalah dengan mengubah deuteron berenergi tinggi menjadi atom deuterium yang netral. Kemudian atom deuterium tersebut dimasukkan ke dalam wadah dengan lebih mudah ( karena tidak terpengaruh oleh medan magnet wadah penampung ) dan akhirnya terpecah menjadi elektron dan deuteron yang terperangkap dalam wadah.

### III.3. PENGURUNGAN PLASMA ( *PLASMA CONFINEMENT* )

Tingginya suhu kerja dari reaksi fusi mengharuskan adanya pembatasan ruang bagi plasma. Pengurungan harus dapat mencegah plasma bersentuhan dengan dinding wadahnya yang disebut *vacuum chamber*. Hal ini bukan saja disebabkan oleh karena ketidakmampuan material konstruksi ( yang telah dikenal )

untuk menahan plasma bersuhu sangat tinggi tersebut, melainkan juga karena dinding kamar hampa dapat memadamkan reaksi fusi yang tengah berlangsung.

Partikel dalam plasma bergerak lurus dengan arah tak menentu dan dengan kecepatan rata-rata puluhan ribu kilometer per detik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3. Pada kecepatan ini, semua partikel plasma menumbuk dinding kamar dalam satuan waktu mikrodetik. Penumbukan-penumbukan ini mengakibatkan partikel-partikel tersebut kehilangan energi kinetik dan akhirnya memadamkan reaksi fusi. Jadi walaupun plasma dengan suhu yang diinginkan telah terbentuk, tidak terdapat cukup waktu untuk menggunakan energi yang dihasilkan karena plasma sudah padam. Selain itu, pengurungan plasma juga dimaksudkan untuk menekan plasma hingga mencapai kerapatan partikel yang dibutuhkan.

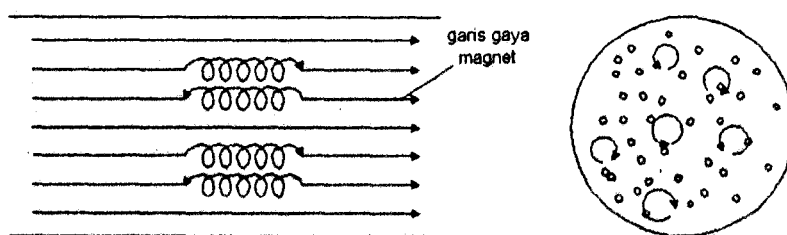


GAMBAR 3.3  
ARAH GERAKAN PARTIKEL PLASMA  
TANPA PENGURUNGAN

Terdapat 2 ( dua ) metode yang dapat dipergunakan untuk menahan plasma, yaitu metode *magnetic confinement* dan metode *inertia confinement*.

### III.3.1. Magnetic Confinement

Metode ini menggunakan medan magnet untuk menahan plasma yang berdasarkan bahwa plasma tersusun atas partikel-partikel bermuatan, sehingga medan magnet dapat digunakan untuk membentuk dan mengarahkan gerakan partikel plasma. Partikel-partikel bermuatan tidak dapat bergerak melintasi gaya garis magnet, akan tetapi bergerak secara melingkar sepanjang garis gaya magnet, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.4. Partikel positif bergerak berlawanan arah dengan gerakan partikel negatif. Dengan demikian, penggunaan suatu medan magnet yang cukup kuat dapat membatasi gerakan partikel bermuatan sehingga ruang gerak partikel plasma menjadi terbatas.



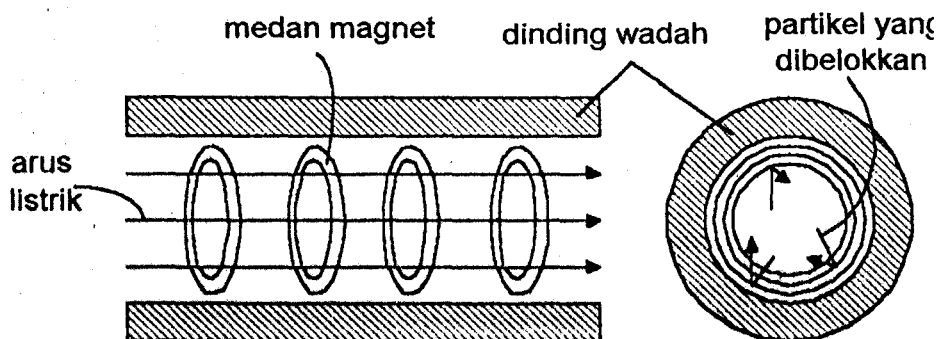
GAMBAR 3.4  
GERAKAN PARTIKEL PLASMA  
DALAM MEDAN MAGNET

Kecepatan gerak partikel dalam medan magnet dapat diuraikan atas dua komponen yaitu searah dengan garis gaya magnet atau komponen axial dan tegak lurus terhadap garis gaya magnet atau komponen radial. Komponen axial menjelaskan kecepatan gerak partikel dalam arah sepanjang garis gaya magnet, sedang untuk komponen radial menjelaskan besar radius gerak melingkar partikel.

Besar komponen radial dipengaruhi oleh massa partikel dan kuat medan magnet. Radius gerakan melingkar partikel berbanding lurus dengan massa partikel dan berbanding terbalik dengan kuat medan. Karena massa elektron lebih ringan daripada massa ion, maka radius gerakan ion plasma lebih besar daripada radius gerakan elektron dalam suatu medan magnet yang sama.

Terdapat 3 konsep utama dalam magnetic confinement, yaitu konsep *magnetic pinch*, *magnetic mirror* dan *confinement by closed-geometry*.

Konsep magnetic pinch confinement ( pengurungan dengan jepitan magnetis ) dilakukan dengan melewati arus listrik yang besar ke dalam plasma yang akan membentuk medan magnet yang mengelilingi arus tersebut. Medan magnet yang terbentuk akan mendorong partikel plasma menjauhi dinding dan kemudian menjepit plasma ke pusat tabung, seperti yang terlihat pada gambar 3.5.

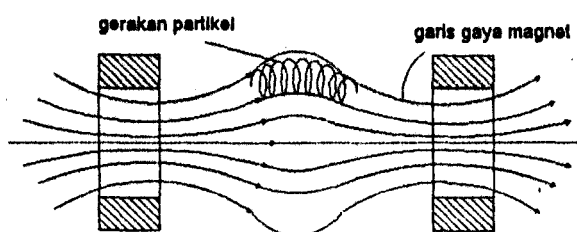


GAMBAR 3.5  
MAGNETIC PINCH CONFINEMENT

Pada konsep magnetic mirror confinement ( pengurungan dengan kaca magnetis ), partikel-partikel plasma tidak dapat meninggalkan daerah kurungan,

walaupun garis gaya magnet dapat meninggalkan daerah tersebut melalui ujung kurungan yang terbuka. Hal ini disebabkan kuat medan magnet pada kedua ujung peralatan dibuat lebih kuat daripada bagian yang lain, seperti yang terlihat pada gambar 3.6.

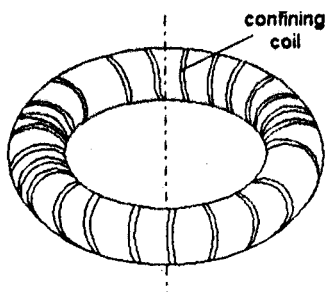
Saat partikel-partikel plasma bergerak mendekati ujung kurungan, kuat medan di daerah tersebut memaksa partikel untuk bergerak melingkar lebih cepat dan dalam radius yang lebih kecil sehingga komponen kecepatan axial berkurang. Bila seluruh energi gerak partikel sepanjang garis gaya magnet menjadi energi gerak melingkar, partikel akan terpantul kembali ke dalam daerah kurungan.



GAMBAR 3.6  
SKEMA SEDERHANA  
MAGNETIC MIRROR CONFINEMENT

Konsep kurungan plasma dengan medan magnet yang lainnya adalah konsep confinement by closed-geometry ( kurungan bentuk tak berujung ) yang menjadi dasar dari mesin Tokamak buatan Rusia. Dalam konsep ini, wadah penampung plasma berbentuk toroida ( seperti kue donat ). Garis gaya magnet dibuat dengan mengalirkan arus listrik pada kumparan yang membungkus wadah penampung, seperti yang terlihat pada gambar 3.7. Medan magnet yang dihasilkan

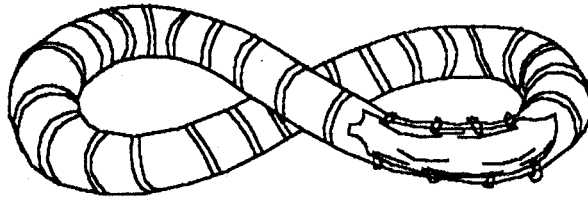
tidak berujung dan mempunyai arah ke pusat tabung sehingga plasma tidak dapat partikel plasma tidak dapat keluar dari mesin dan hanya dapat bergerak sepanjang keliling wadah.



GAMBAR 3.7<sup>9)</sup>  
CONFINEMENT BY CLOSED-GEOMETRY

Karena kumparan bagian dalam wadah lebih rapat daripada bagian luar, medan magnet pada bagian luar donat lebih lemah daripada medan magnet bagian dalam. Tidak seragamnya kuat medan menyebabkan partikel plasma menyimpang dalam arah radial mendekati bagian luar wadah. Pencegahan terjadinya hal ini dapat dilakukan dengan mengubah tabung toroida sehingga membentuk angka delapan, seperti yang terlihat pada gambar 3.8. Dengan diubahnya tabung wadah plasma, medan magnet bagian luar donat menjadi sama besar dengan medan pada bagian luar, sehingga gerakan partikel plasma tidak menyimpang dan tetap berada dalam pusat dari tabung. Konfigurasi ini dikenal dengan sebutan *stellarator*.

<sup>9)</sup> El-Wakil, Dr., op.cit, hal. 537



GAMBAR 3.8<sup>9)</sup>  
STELLARATOR

### III.3.2. Inertial Confinement

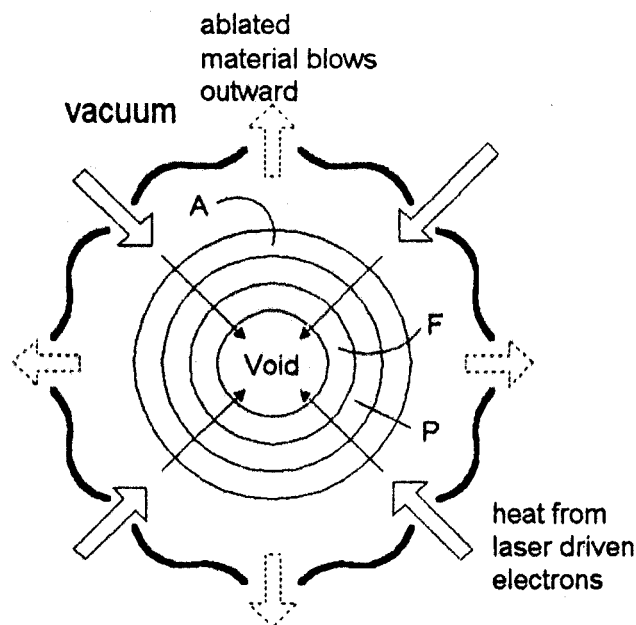
Dalam metode ini, reaktan dibentuk menjadi butiran bertekanan dengan diameter sekitar 100 micron, yang disebut *pellet*. Setiap pellet terdiri dari beberapa lapisan. Lapisan paling dalam adalah rongga kosong yang dibungkus oleh suatu lapisan yang berisi campuran deuterium dan tritium sebagai bahan bakar. Lapisan berikutnya, yang membungkus lapisan bahan bakar, adalah lapisan *pusher* yang terbuat daripada logam dengan nomor atom tinggi, misalnya emas. Lapisan paling luar adalah lapisan daripada plastik yang disebut *ablator*.

Setiap butir pellet yang disuntikkan ke dalam reaktor akan ditembak dengan suatu pulsa energi dari berbagai arah. Pulsa energi tersebut dapat berasal dari sinar laser atau pemancar partikel bermuatan yang lain, misalnya pemancar elektron / ion. Bila berasal dari sinar laser, disebut *laser fusion* dan bila pulsa energi berasal dari pancaran partikel bermuatan, disebut *particle beam fusion*. Gambar 3.9 memperlihatkan sebutir pellet yang ditembak oleh sinar laser.

Pulsa energi akan memecah permukaan luar pellet ( lapisan ablator ) dan menimbulkan tekanan pada pellet sebesar  $10^7$  sampai  $10^8$  atm. Tekanan ini menyebabkan pellet menyusut sehingga kerapatannya menjadi 100 sampai 1000 kali

<sup>9)</sup> ibid, hal. 537

kerapatan sebelumnya. Lapisan pusher terionisasi dengan cepat, pulsa energi diserap dalam kerapatan yang tinggi dan akhirnya timbul reaksi fusi. Pada saat itu bahan bakar tertahan oleh gaya inersia dan memulai reaksi fusi yang sesaat bertahan sendiri sebelum akhirnya berhenti dan padam. Besar energi yang diserap plasma dengan kerapatan yang baru adalah  $n^2$  kali besar energi yang dibangkitkan. Dengan demikian, bila dibutuhkan energi sebesar  $10^9$  sampai  $10^{12}$  Joule, dengan menggunakan pellet cukup dibangkitkan energi pulsa sebesar  $10^3$  sampai  $10^6$  Joule.



Keterangan : A - Ablator ; F - Bahan bakar D-T ;  
P - Penekan ( Pusher )

GAMBAR 3.9 <sup>7)</sup>  
PRINSIP KERJA FUSI LASER

<sup>7)</sup> Ronald Allen Knief, op.cit, p. 521



### III.4. KERAPATAN PLASMA DAN SELANG WAKTU PENGURUNGAN

Telah diketahui bahwa plasma adalah bahan bakar fusi yang berada pada suhu sangat tinggi sehingga berwujud gas yang terionisasi sempurna. Besar tekanan plasma ( dyne/cm<sup>2</sup> ) dapat dituliskan dalam gas seperti yang terlihat pada persamaan 3.7.

$$p_p = n k T \quad (3.7)$$

dimana :  $n$  = kerapatan partikel plasma ( partikel / cm<sup>3</sup> )

$k$  = konstanta Boltmann =  $1,3805 \times 10^{-16}$  erg / ° K

$T$  = temperatur absolut ( ° K )

Tekanan kurungan magnetis  $p_B$  yang diberikan kepada plasma diberikan

$$p_B = \frac{B^2}{8\pi} \quad (3.8)$$

dimana :  $B$  = kuat medan magnet =  $I / 5 r$

$I$  = arus listrik ( Ampere )

$r$  = jari-jari kurungan ( cm )

Dalam kenyataannya, kuat medan magnet yang dapat dibuat adalah terbatas. Hal ini mengakibatkan besar tekanan yang dapat diberikan kepada plasma juga terbatas. Oleh karena itu persamaan 3.7 dan persamaan 3.8 menjadi

$$p_p = p_B = 0,005 I / \pi r^2 \quad (3.9)$$

Berdasar persamaan 3.7, terbatasnya  $p_p$  sedang  $T$  adalah sangat tinggi , maka yang paling memungkinkan adalah mengurung plasma dalam kerapatan  $n$  yang rendah.

Selain kuat medan magnet dan kerapatan partikel plasma, faktor yang perlu diperhatikan dalam usaha membentuk reaksi fusi adalah selang waktu pengurungan plasma (*confinement time*) yang tepat. Bila *confinement time* terlalu singkat, plasma akan padam sebelum energi panas diberikan kepada bahan bakar yang baru disuntikkan ke dalam wadah penampung. Diperlukan nilai *confinement time* yang lebih lama agar jumlah reaksi fusi lanjutan dapat terjadi. Akan tetapi, bila *confinement time* terlalu lama, mengakibatkan suhu elektron dalam plasma menjadi terlalu tinggi yang dapat berakibat buruk terhadap dinding reaktor.

Untuk menentukan faktor-faktor penting dalam reaksi fusi, dapat dipakai kriteria Lawson. Kriteria Lawson untuk reaktor berbahan bakar hanya deuterium (reaktor D-D) diberikan pada persamaan 3.10, sedangkan untuk reaktor D-T diberikan pada persamaan 3.11.

$$n \tau > 10^{16} \quad (3.10)$$

$$n \tau > 10^{14} \quad (3.11)$$

Dengan menggunakan kriteria Lawson, untuk reaktor D-T dengan kerapatan  $10^{15}$  partikel /  $\text{cm}^3$ , harus dapat ditahan dalam wadahnya dengan waktu lebih dari 0,1 detik. Sedang untuk reaktor D-D membutuhkan waktu 100 kali lebih besar atau sebesar 10 detik.

### III.5. BAHAN BAKAR FUSI NUKLIR

Telah disebutkan pada bagian sebelumnya, bahwa bahan bakar fusi nuklir adalah deuterium ( ${}_1\text{D}^2$ ), tritium ( ${}_1\text{T}^3$ ) dan helium-3 ( ${}_2\text{He}^3$ ). Helium adalah unsur yang tersedia di alam secara bebas. Akan tetapi Deuterium dan Tritium bukan merupakan unsur yang dapat diperoleh langsung dari alam. Harus dilakukan proses tertentu untuk mendapatkannya dari alam.

#### III.5.1. Deuterium

Deuterium adalah isotop hidrogen yang memiliki sebuah elektron, sebuah proton dan sebuah neutron. Sumber deuterium yang utama adalah air. Sumber yang lain adalah gas alam dan minyak bumi. Akan tetapi pengolahan minyak bumi dan gas bumi untuk mendapatkan deuterium adalah tidak ekonomis, karena harus diolah terlebih dahulu secara kimiawi menjadi bahan lain.

Kadar deuterium dalam air berbeda dari satu tempat dengan tempat yang lain. Perbedaan ini ditentukan oleh proses isotop yang terjadi saat air menguap dan saat uap air mengembun. Kadar deuterium di beberapa tempat ditunjukkan tabel 3.2. Kadar deuterium dalam air laut daerah tropis adalah sekitar 0,0156 a/o (atom percent).

TABEL 3.2 <sup>8)</sup>  
KADAR DEUTERIUM DALAM AIR DI BERBAGAI TEMPAT

	Percent difference from standard	Atom ppm deuterium
A. Friedman, standard contains 0,0148 a/o D		
Surface ocean waters		
Mid-Atlantic Ocean at equator	+ 5,41	156,0
Jacksonville, Fla.	+ 5,02	155,4
La Jolla, Calif.	+ 4,56	154,8
Bering Sea	+ 4,07	154,0
West coast of Greenland	+ 2,42	151,6
North American rivers		
Columbia at Trail, B.C., 1943	-10,10	132,9
Missouri at Kansas City, Kan., 1948	- 7,06	137,5
Colorado at Yuma, Ariz., 1948	- 6,06	139,0
Connecticut, 1948	- 2,15	144,8
Mississippi at Baton Rouge, La., 1948	+ 0,39	148,4
Red at Colbert, Okla., 1948	+ 3,05	152,5
Arkansas at Van Buren, Ark., 1948	+ 3,25	152,8
Rio Grande at Mission, Tex., 1948	+ 3,28	152,8
B. Craig, standard ( mean ocean water ) contains 0,01566 a/o D		
1955 - 1956 snow, 200 mil east of Thule, Greenland	-23,62	119,5
Snow, Little America, Antarctica	-14,32	134,1
Columbia River, Hood River, Ore.	-13,64	135,2
Danube River, Regensburg, Germany	- 7,76	144,4
Hudson River	- 6,00	147,2
Niagara River	- 5,30	148,3
Gulf of Suez, Red Sea	+ 1,42	158,8
White Nile, Khartoum, Sudan	+ 4,22	163,2
Chicago, mean precipitation	- 5,00	149,0
rain, 4 / 10 / 54	+ 0,21	156,9
snow, 2 / 5 / 54	-16,19	131,2

Deuterium di dalam air terdapat dalam 2 bentuk, yaitu HDO dan D<sub>2</sub>O yang dikenal sebagai air berat ( moderator reaktor fissi jenis HWR, PHWR ). Untuk mendapatkan deuterium sebagai bahan bakar, diperlukan proses kimia yang disebut distilasi seperti persamaan 3.12.



Sedangkan untuk mendapatkan deuterium murni dari air berat dilakukan proses elektrolisa, seperti persamaan 3.13.

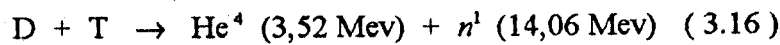
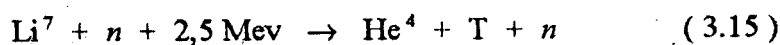
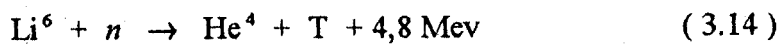


<sup>8)</sup> Benedict- Pigford and Levi, Nuclear Chemical Engineering, Second Edition, McGraw-Hill Book Co., USA, 1981, hal. 709

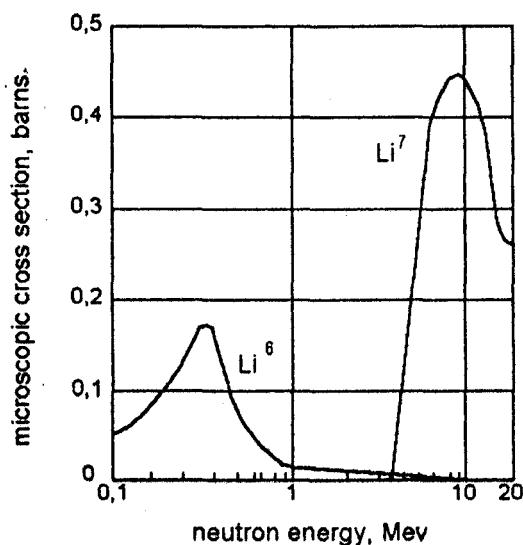
### III.5.2. Tritium

Tritium adalah isotop hidrogen yang memiliki satu elektron, satu proton dan dua neutron. Tritium bukan unsur bebas dan tidak terdapat di alam. Untuk mendapatkan tritium, diperlukan reaksi antara lithium dengan neutron.

Semua lithium alam terdiri atas  $\text{Li}^6$  sebesar 7,42 % dan  $\text{Li}^7$  92,58 % sebesar 92,58 %. Persamaan 3.12 dan 3.13 menunjukkan reaksi pembentukan tritium.



Cross section kedua. reaksi berbanding besar energi neutron terlihat pada gambar 3.10. Cross section reaksi  $\text{Li}^7$  adalah lebih tinggi bila dengan neutron berenergi 14 Mev yang merupakan neutron hasil reaksi D-T ( persamaan 3.16 ). Akan tetapi, cross section  $\text{Li}^7$  lebih kecil untuk neutron yang dipercepat. Untuk neutron yang dipercepat, cross section  $\text{Li}^6$  yang lebih tinggi.

GAMBAR 3.10 <sup>9)</sup>

CROSS SECTION REAKSI PEMBENTUKAN TRITIUM SEBAGAI  
FUNGSI ENERGI NEUTRON

Reaksi lithium, persamaan 3.14 dan 3.15, tidak memproduksi sendiri neutron dalam reaksinya. Setiap satu neutron yang bereaksi, akan menghasilkan satu triton ( inti tritium ). Sumber neutron tersebut dapat berasal dari neutron yang dipercepat maupun hasil reaksi D-T. Akan tetapi, reaksi D-T tidak selalu menghasilkan neutron dalam reaksinya. Sebagian neutron yang dihasilkan hilang. Hilangnya neutron hasil reaksi D-T dapat disebabkan oleh adanya kebocoran, hilang dalam siklus pemulihan ( dalam condenser ). Oleh karena itu, diperlukan nilai rasio pembentukan tritium ( jumlah triton terbentuk / jumlah triton yang hilang ) lebih dari 1,15 agar reaksi fusi tidak terhenti, karena tidak adanya tritium.

Lithium sebagai sumber tritium, diletakkan diantara dinding reaktor dan plasma agar dapat langsung menerima neutron hasil reaksi D-T. Selain untuk

<sup>9)</sup> El-Wakil, Dr., *op.cit*, hal 550

membuat tritium, peletakan selimut lithium dalam reaktor juga berfungsi sebagai pendingin dari reaktor sekaligus pelindung dinding reaktor dari hujan neutron berenergi tinggi yang dapat merusak dinding tersebut.

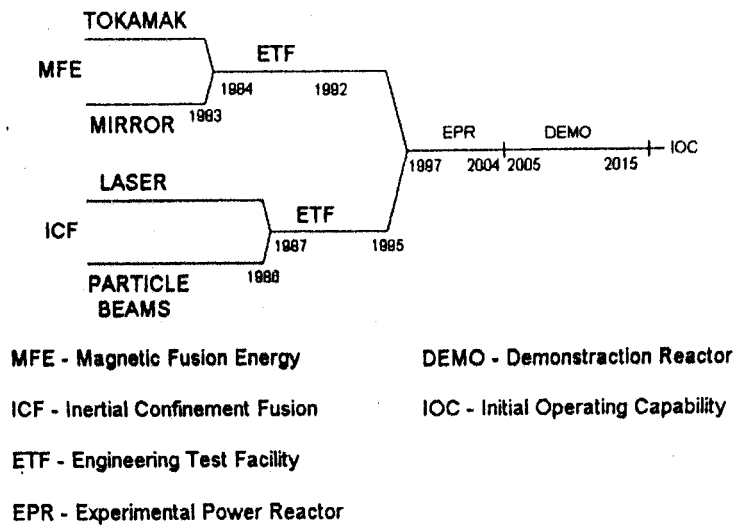
### III.6. PENERAPAN TEKNOLOGI FUSI NUKLIR PADA PUSAT

#### PEMBANGKIT LISTRIK

Generasi pertama pembangkit listrik tenaga fusi nuklir menggunakan reaktor D-T. Hal ini disebabkan oleh karena reaksi D-T memiliki energi ambang yang paling rendah, penguatan energi paling besar. Oleh karena itu, pembangkit tenaga listrik yang akan dibahas adalah pembangkit yang menggunakan deuterium dengan tritium sebagai bahan bakar.

Perkembangan reaktor fusi nuklir yang menggunakan magnetic confinement didasarkan pada sistem reaktor tokamak. Daftar reaktor fusi nuklir magnetis yang ada dan hasil kemajuan yang telah dicapai, berdasar laporan IAEA ( *International Atomic Energy Agency* ) tahun 1989, dapat dilihat pada tabel 3.2 dan tabel 3.3.

Pada gambar 3.11 terlihat rencana pengembangan teknologi fusi nuklir hingga menjadi pembangkit tenaga listrik yang ekonomis menurut ANS ( *American Nuclear Society* ). Terlihat dari gambar tersebut, bahwa 4 jenis reaktor fusi, yaitu tokamak, mirror, laser dan particle beams, diharapkan dapat beroperasi dalam pembangkit tenaga listrik setelah tahun 2015.

GAMBAR 3.11 <sup>10)</sup>

RENCANA PENGEMBANGAN TEKNOLOGI FUSI NUKLIR  
MENURUT A.N.S.

Adapun hasil pengembangan reaktor fusi nuklir magnetik, berdasar laporan IAEA ( *International Atomic Energy Agency* ) tahun 1989, dapat dilihat pada tabel 3.3.

TABEL 3.3 <sup>11)</sup>

PERKEMBANGAN REAKTOR FUSI MAGNETIK ( TOKAMAK )  
PADA TAHUN 1989

Major radius	( m )	6,00
Plasma current	( MA )	15 - 20
Fusion power	( MW )	3.000
Total thermal power	( MW )	3.600
Net electric power	( MW )	1.200

<sup>10)</sup> Briggs, William B., The Future of Fusion Power Comes into Focus, 14th Congress of the World Energy Conference, Montreal-Cannada, 1989, hal. 2531

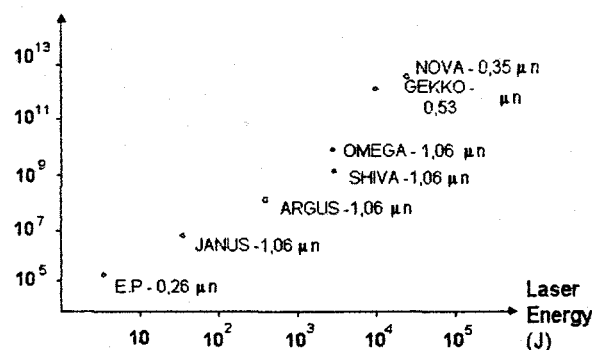
<sup>11)</sup> Leiser & Demchenko, Nuclear Fusion - Inexhaustible Source Energy for Tomorrow, 14th Congress of the World Energy Conference, Montreal, 1989



TABEL 3.4 <sup>12)</sup>  
 REAKTOR FUSI NUKLIR MAGNETIK ( TOKAMAK )  
 DI DUNIA PADA TAHUN 1989

Device	Location	Status
JET	European Community ( United Kingdom )	Operating
DIII - D	United States ( GA Technologies )	Operating
Alcator C-Mog	United States ( MIT )	Under construction
TFTR	United States ( PPPL )	Operating
JT-60	Japan ( Naka-machi )	Operating
T-15	U.S.S.R ( Kurchatov )	Under construction
ASDEX-Upgrade	Federal Republic of Germany ( Garching )	Under construction
Frascati Tokamak Upgrade	Italy ( Frascati )	Under construction
TEXTOR	Federal Republic of Germany ( Julich )	Operating

Sedang perkembangan reaktor fusi inersia sampai tahun 1989 adalah terbentuknya lebih dari  $10^{13}$  neutron dengan sebuah tembakan laser dari sebuah peralatan yang dinamakan Nova Glass Laser ( di laboratorium Livermore, Amerika Serikat ) dan Gekko XII galss laser ( di Institute of Laser Engineering, Jepang ). Gambar 3.12 menunjukkan jumlah neutron yang dihasilkan dari penembakan dengan panjang gelombang laser yang berbeda-beda.



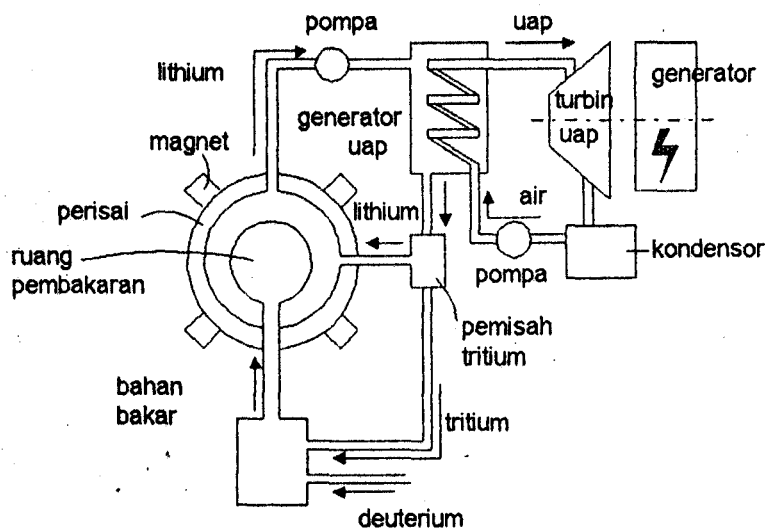
GAMBAR 3.12 <sup>13)</sup>  
 JUMLAH NEUTRON HASIL PENEMBAKAN SINAR LASER

<sup>12)</sup> loc.cit

<sup>13)</sup> ibid., hal. 2540

### III.6.1. Pusat Listrik Fusi Nuklir dengan Reaktor Magnetik

Gambar 3.13 memperlihatkan skema prinsip kerja sebuah pusat listrik tenaga fusi nuklir yang menggunakan reaktor tokamak. Bahan bakar fusi diinjeksikan ke dalam ruang pembakaran. Lithium diletakkan didalam ruang pembakaran digunakan sebagai medium pendingin dan penerimaan panas hasil reaksi fusi. Lithium disirkulasikan dengan menggunakan pompa. Dalam generator, energi panas yang terdapat dalam lithium dipindahkan kepada air. Air akan menjadi uap dan digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang akhirnya akan menggerakkan generator listrik. Dalam proses di dalam ruang pembakaran, sejumlah lithium bereaksi dengan netron menghasilkan tritium yang akan dipisahkan dari lithium dalam sebuah alat pemisah (divertor).



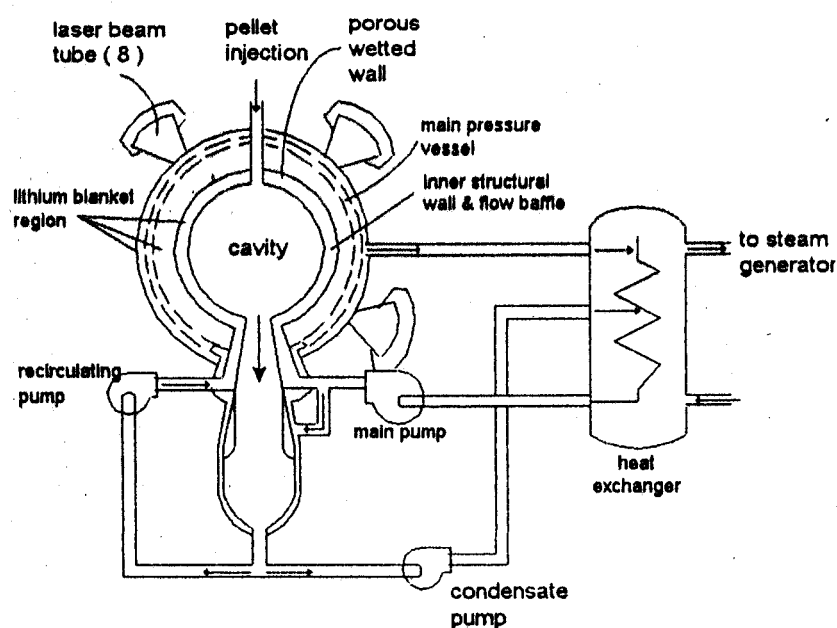
GAMBAR 3.13 <sup>14)</sup>

PRINSIP KERJA ( THERMAL) PUSAT LISTRIK TENAGA FUSI  
DENGAN MAGNETIC CONFINEMENT

<sup>14)</sup> Abdul Kadir, Prof. Ir., op.cit, hal. 366

### III.6.2. Pusat Listrik Tenaga Fusi Laser

Dalam Pusat Listrik Tenaga Fusi Laser, pellet diinjeksikan ke dalam suatu ruang ( *cavity* ) di dalam reaktor. Tepat pada pusat dari ruang tersebut, ditembakkan laser yang akan menyundut pellet sehingga timbul reaksi fusi. Energi hasil reaksi fusi akan diserap oleh lithium cair yang berada di sekeliling ruang . Lithium cair mengalir melalui dinding niobium yang berongga renik ( *porous wetted wall* ) untuk menuju alat pemindah panas ( *heat exchanger* ) yang memindahkan energi panas lithium kepada air. Energi panas merubah air menjadi uap yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang akhirnya akan menggerakkan generator listrik. Gambar 3.14 menjelaskan prinsip kerja pusat listrik tenaga fusi laser.



GAMBAR 3.14 <sup>15)</sup>

PRINSIP KERJA ( THERMAL ) PUSAT LISTRIK TENAGA FUSI LASER

<sup>15)</sup> Ronald Allen Knief, *op.cit*, hal. 524

### III.6.3. Pusat Listrik Tenaga Fusi dengan Binary Vapor Cycle

Pada bagian ini akan diterangkan konsep pembangkit listrik tenaga nuklir yang juga dikenal dengan *controlled thermonuclear power plant* atau CPTR dan skema pembangkit terdapat pada gambar 3.15.

Pada gambar 3.15, terlihat reaktor fusi yang dapat bertipe stellarator maupun tipe magnetic mirror. Plasma tertahan oleh medan magnet di dalam suatu wadah yang disebut *vacuum chamber*. *Divertor* yang berfungsi untuk memisahkan partikel asing yang terdapat dalam plasma, termasuk dalam kesatuan wadah tersebut. Dinding wadah penampung menerima aliran panas dari plasma dalam bentuk bremsstrahlung dan radiasi synchrotron, oleh karena itu dinding penampung harus memiliki pendingin. Dinding harus terbuat dari bahan yang tahan terhadap radiasi, tidak keropos oleh zat pendingin. Dalam CPTR, Niobium dan molybdenum yang dipakai sebagai bahan untuk dinding penampung.

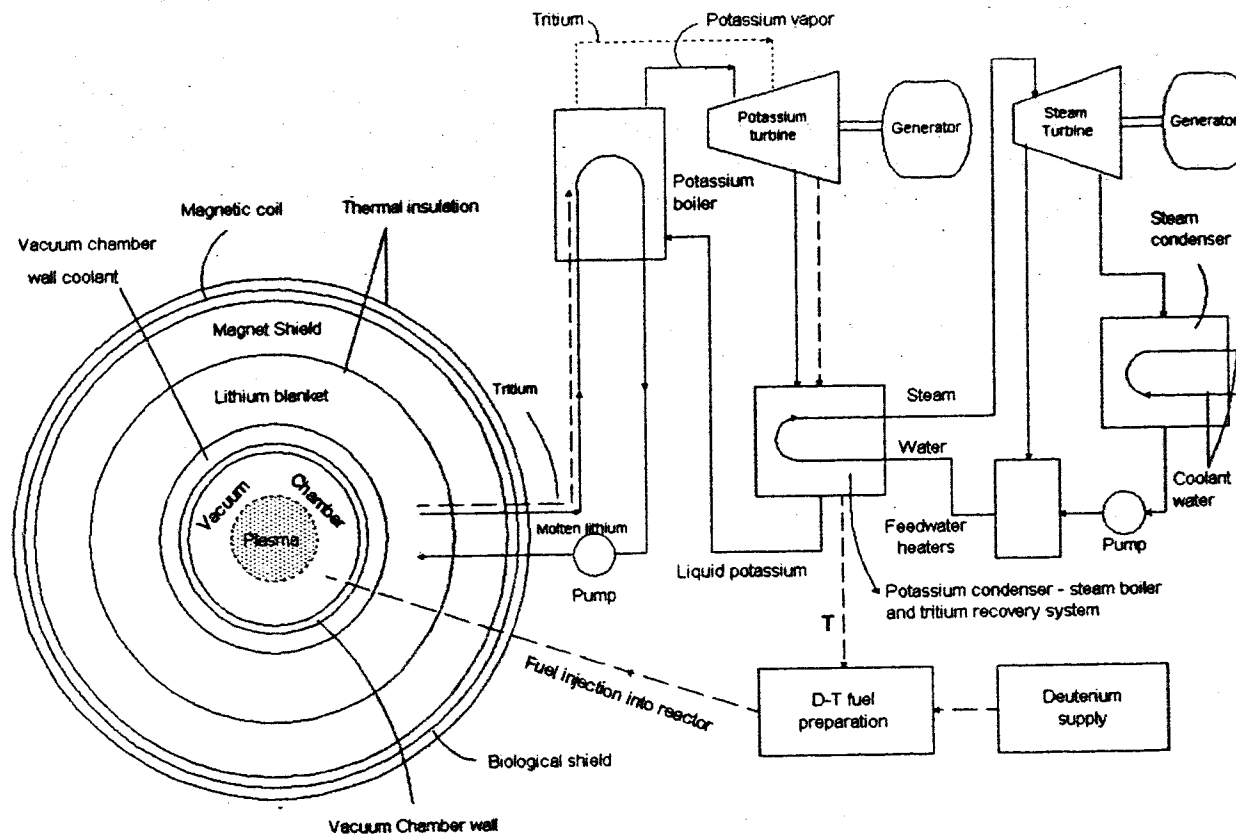
Dipakainya selubung lithium ( *lithium blanket* ) yang membungkus wadah penampung plasma memiliki berbagai fungsi, antara lain

1. bertindak sebagai moderator dan penyerap neutron hasil reaksi D-T serta mengubah energi kinetik neutron tersebut menjadi panas dengan reaksi yang dalam persamaan 3.16.
2. bertindak sebagai medium penghantar panas bagi pembangkit listrik
3. dapat bertindak sebagai sumber tritium.
4. merupakan pelindung awal bagi kumparan magnet

Dalam konsep pembangkit CPTR, bahan selubung meneruskan panas reaktor kepada potassium cair dalam suatu pemindah panas yang menghasilkan uap potassium yang dipergunakan dalam turbin uap potassium. Uap potassium kemudian masuk ke dalam condenser yang mengubahnya kembali menjadi cair. Panas dari condenser potassim tersebut digunakan untuk membuat uap air yang akan menggerakkan turbin uap konvensional. Jadi dalam konsep ini terdapat dua siklus uap. yang pertama adalah siklus uap potassium dengan temperatur tinggi dan yang kedua adalah siklus uap air dengan temperatur rendah.

Sejumlah tritium yang terbentuk pada selubung lithium, diberikan kepada siklus uap potassium yang akan ditangkap oleh condenser. Tritium tersebut digabung dengan deuterium sebagai bahan bakar baru yang kemudian disuntikkan ke dalam reaktor.

Dengan tingginya suhu kerja dari sistem kembar tersebut di atas, efisiensi panas dari sistem diharapkan lebih dari 60 %. Efisiensi ini lebih besar 50 % dari efisiensi terbaik pembangkit listrik bahan bakar fosil ( 42 % ) dan 100 % lebih tinggi daripada efisiensi pembangkit listrik tenaga nuklir air biasa. Hal ini berarti polusi panas per Kw(e) yang rendah bila dibandingkan dengan pembangkit listrik jenis lain. Kelebihan ini merupakan tambahan bagi kelebihan dari pembangkit fusi nuklir yang telah diketahui, yaitu minimnya adanya limbah radioaktif dan tidak adanya polusi udara yang dihasilkan.



GAMBAR 3.15  
SKEMA PRINSIP KERJA PEMBANGKIT FUSI NUKLIR  
DENGAN BINARY VAPOR CYCLE

## BAB IV

# ANALISA EKONOMI DAN LINGKUNGAN TEKNOLOGI FUSI NUKLIR UNTUK PUSAT PEMBANGKIT DI INDONESIA

Dalam proses pemilihan teknologi pembangkit listrik selain memperhitungkan aspek teknis, juga perlu memperhitungkan aspek ekonomis dan aspek lingkungan. Dalam aspek ekonomis, kelayakan suatu pembangkit ditentukan dari harga listrik yang diproduksi. Sedang dalam aspek lingkungan, suatu pembangkit disebut layak bila tidak menghasilkan polutan yang berbahaya bagi kesehatan manusia maupun lingkungan hidup.

### IV.1. BIAYA SISTEM PEMBANGKIT

Dari sudut pandang ekonomi, selalu diinginkan untuk mengembangkan sistem pembangkit tenaga listrik yang dilakukan dengan menambah pembangkit yang murah pembangunannya dan menghasilkan tenaga listrik dengan biaya yang rendah ( *Least Cost Principle* ).

Dalam membahas atau membandingkan teknologi-teknologi pembangkitan, terdapat dua hal yang harus dipertimbangkan dari sisi ekonomi, yaitu

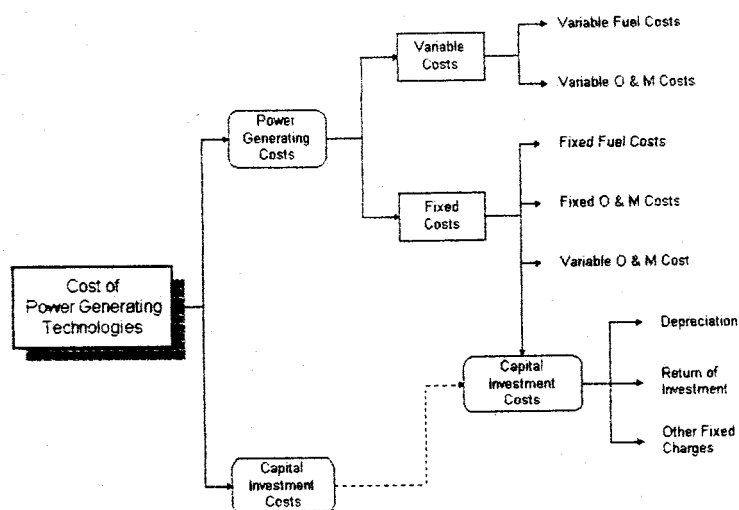
1. *Capital investment cost*, dinyatakan dalam US \$ / kW

Merupakan besar modal investasi yang diperlukan untuk membangun sebuah pembangkit tenaga listrik.

2. *Power generating cost*, dinyatakan dalam mills / kWh

Terdiri dari biaya-biaya yang berhubungan dengan investasi modal awal sebuah pembangkit ( *capital cost* ), biaya bahan bakar ( *fuel cost* ) dan biaya operasi dan perawatan ( *Operation & Maintenance Cost* ).

Untuk pembahasan lebih lanjut, biaya-biaya diatas dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu biaya tetap ( *fixed charge* ) dan biaya tak tetap ( *variable cost* ). Penjelasan tersebut dapat digambarkan secara umum pada gambar 4.1.



GAMBAR 4.1 <sup>17)</sup>

PENGGOLONGAN BIAYA-BIAYA TEKNOLOGI PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

<sup>17)</sup> IAEA, Expansion Planning of Electrical Generating System, Vienna, hal. 152



Biaya-biaya tetap berkaitan dengan pengeluaran untuk peralatan yang dipakai dalam periode waktu panjang dan sifatnya independen terhadap besar tenaga listrik yang dihasilkan, misalnya reaktor nuklir. Sedangkan biaya-biaya tidak tetap adalah berkaitan dengan pengeluaran untuk barang-barang dan service yang digunakan dalam periode waktu yang relatif pendek dan bergantung pada besar tenaga listrik yang dihasilkan.

Dalam pemilihan alternatif teknologi pembangkitan tenaga listrik yang akan digunakan, analisa dari perbandingan biaya tetap dan biaya tak tetap terhadap tenaga listrik yang dihasilkan, merupakan pertimbangan utama dari sudut ekonomi.

#### IV.1.1. Metode Pembandingan Biaya

Pembandingan antara berbagai alternatif teknologi konversi untuk membangkitkan tenaga listrik biasanya diperhitungkan sampai sambungan listrik masuk jaringan transmisi yang biasa disebut biaya loko rel ( *busbar cost* ). Dalam pembahasan nanti, biaya ini tidak turut diperhitungkan.

Biaya pembangkitan yang diperhitungkan meliputi biaya penyediaan lokasi, biaya biaya pembangunan pusat pembangkit, biaya pembelian bahan bakar, biaya pemeliharaan dan operasi, dan biaya-biaya lainnya.

Pada umumnya terdapat tiga cara pokok dalam menghitung biaya pembangkitan, seperti yang terlihat pada tabel 4.1. Untuk kesederhanaan proses pembandingan biaya dari beberapa jenis pembangkit tenaga listrik, metode pembangkitan tahunan yang akan digunakan dalam pembahasan nanti.

Penggunaan metode pembangkitan tahunan akan memberi petunjuk perbandingan yang jelas dari berbagai alternatif pembangkit tenaga listrik berdasar jenis teknologi yang dipergunakan. Biaya pembangkitan tahunan biasanya terbagi atas tiga komponen biaya, yaitu :

1. Biaya modal ( *capital cost* )
2. Biaya bahan bakar ( *fuel cost* )
3. Biaya operasi dan perawatan ( *O & M cost* )

TABEL 4.1 <sup>18)</sup>

## CARA PENDEKATAN DASAR UNTUK PERHITUNGAN BIAYA

## PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

Metode	Dasar	Uraian
1. Biaya Pembangkitan Tahunan	Biaya-biaya didasarkan pada sebagian modal + operasi dan biaya bahan bakar satu tahun dibagi oleh output dalam satu tahun ini	Sering digunakan; hanya suatu pendekatan akuntansi. Perhitungan satu tahun bukan suatu pedoman yang cukup untuk suatu kebijaksanaan investasi.
2. Levelized Costs untuk satu central	Biaya dari satu unit yang baru dinilai sebanyak modal yang dipakai selama umumnya ditambah biaya operasi dan bahan bakar ( dalam present value ). Nilai ini dibagi dengan output ( dalam present value ) guna menghasilkan levelized costs.	Dasar perbandingan yang layak untuk pemilihan suatu investasi melalui suatu perbandingan berdasarkan harga nasional dan internasional.
3. Pendekatan perencanaan sistem	Pengaruh pembangkit baru pada biaya total operasi disimulasikan berdasarkan asumsi kebutuhan investasi dan profil beban.	Dasar untuk keputusan investasi dengan meminimumkan biaya penyediaan listrik jangka panjang. Harga terbatas untuk perbandingan internasional.

<sup>18)</sup> Nengah Sudja, Dr. Ing., Peranan Batubara dan Gas Alam Bagi Pembangkit Listrik di Indonesia, Makalah Lokakarya Energi, KNI - WEC, Jakarta, 1988

Persamaan biaya pembangkit berdasar metode biaya pembangkitan tahunan yang telah disederhanakan, dapat dinyatakan dengan rumus berikut

$$k_l = \left( \frac{f_s \cdot P_s}{m \cdot T_o} + \frac{860 U_i}{\eta} + g_s \right) \quad (4.1)$$

$$f_s = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4.2)$$

$$g_s = \frac{O \& M \text{ Cost}}{m \cdot T_o} \quad (4.3)$$

$$m \cdot T_o = AF \times 8760 \quad (4.4)$$

- dimana
- $k_l$  = Biaya pembangkitan ( mills / kWh )
  - $P_s$  = Biaya modal ( \$ / kW )
  - $m$  = Faktor manfaat tahunan ( decimal )
  - $T_o$  = Jam kalender dalam 1 tahun ( = 8760 hour / year )
  - $U_i$  = Biaya bahan bakar ( \$ / kcal )
  - $\eta$  = Efisiensi thermal pembangkit ( % )
  - $g_s$  = Biaya operasi dan pemeliharaan ( mills / kWh )
  - $f_s$  = Faktor pengembalian modal ( decimal )
  - $i$  = Discount rate ( % / year )
  - $n$  = Umur ekonomis ( year )
  - $O \& M \text{ Cost}$  = Biaya operasi dan pemeliharaan dalam 1 tahun  
( \$ / kW.year )
  - $AF$  = Available Factor

#### IV.1.2. Prinsip Biaya Terendah

Dalam proses pemilihan pusat pembangkit yang optimal bagi penyediaan energi listrik dari beberapa jenis teknologi sumber daya energi, perusahaan listrik ( PLN ) pada umumnya berpijak atas prinsip biaya terendah ( fungsi sasaran biaya minimum ) menurut rumus <sup>19)</sup> :

$$\text{Min} \rightarrow P W V \sum_{j=1}^l ( CC + FC + O \& M ) \quad (4.5)$$

dimana      CC    = Capital cost ( mills / kWh )

FC        = Fuel cost ( mills / kWh )

O & M    = Operation and maintenance cost ( mills / kWh )

t          = Kurun waktu perencanaan ( year )

Dengan syarat batas sebagai berikut :

1. Pemenuhan prakiraan beban
2. Tingkat keandalan tertentu harus dipenuhi
3. Persyaratan lingkungan dan sebagainya

Artinya, proses optimasi ini didasarkan atas upaya meminimalkan nilai tunai ( *present worth value* ) dari seluruh biaya selama kurun waktu perencanaan. seluruh biaya yang dimaksud adalah biaya-biaya yang terdiri dari unsur biaya modal ( *capital cost* ), biaya bahan bakar ( *fuel cost* ) dan biaya operasi dan pemeliharaan

<sup>19)</sup> Nengah Sudja, Dr. Ing., Keadaan Kelistrikan di Indonesia dan Permasalahannya, Makalah Lokakarya Energi, Jakarta, 1990

( *O & M cost* ) yang memenuhi syarat batas dalam upaya memenuhi kebutuhan tenaga listrik.

#### IV.2. ANALISA EKONOMI TEKNOLOGI FUSI UNTUK PUSAT PEMBANGKIT

Besar biaya pembangkitan tenaga listrik suatu pembangkit ditentukan oleh tiga komponen biaya, yaitu biaya modal investasi ( *capital cost* ), biaya bahan bakar ( *fuel cost* ) dan biaya operasi dan perawatan ( *O & M cost* ). Komposisi tiga komponen biaya tersebut diperkirakan seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.2.

TABEL 4.2 <sup>20)</sup>

##### KOMPOSISI BIAYA-BIAYA PENYUSUN TOTAL BIAYA PEMBANGKITAN

Uraian	( % )
Biaya modal investasi	80 - 95 %
Biaya bahan bakar	0,1 %
Biaya operasi dan perawatan	5 - 20 %

Dari tabel terlihat bahwa besar biaya modal investasi merupakan penentu utama dalam biaya pembangkitan total PLT Fusi nuklir, kemudian diikuti oleh biaya operasi dan perawatan dan yang terkecil adalah biaya bahan bakar.

<sup>20)</sup> Ronald Allen Knief, *op.cit.*, hal. 530

Kecilnya biaya bahan bakar teknologi fusi nuklir disebabkan oleh besarnya jumlah cadangan deuterium dan tritium sebagai bahan bakar pembangkit, sehingga harganya menjadi rendah.

Dalam proses analisa ekonomi nanti akan digunakan pembangkit jenis lain yang berbahan bakar gas, batubara dan fisi nuklir. Data spesifikasi dari PLT Fusi maupun pembangkit yang lain terlihat pada tabel 4.3.

TABEL 4.3<sup>21)</sup>  
DATA BEBERAPA PEMBANGKIT  
(nilai uang tahun 1989)

URAIAN	Gas			
	Combined Cycle	PLTU batubara	PLT Fisi	PLT Fusi <sup>22)</sup>
Kapasitas (MW)	2 x 300	4 x 400	2 x 938	2 x 938
Lama Pembangunan (Tahun)	3	8	7	10
Biaya Dasar (\$ / kW)	585,3	890,7	2.000	3.800
Umur ekonomis (Tahun)	20	25	25	25
Biaya O & M tiap tahun (\$ / kW.tahun)	7,27	11,64	20,40	32,4
Faktor manfaat (%)	85,3	71,6	70,0	75,0
Jenis bahan bakar	Gas Alam	Batubara	Uranium	D-T
Harga bahan bakar (\$ / 1000 M cal)	10,04	7,18	2,78	0,0004
Effisiensi panas (%)	42	34	32	60

#### IV.2.1. Biaya Modal

Total modal investasi untuk pusat pembangkit tenaga listrik dengan teknologi fusi nuklir terdiri dari biaya langsung dan biaya tak langsung. Sedang

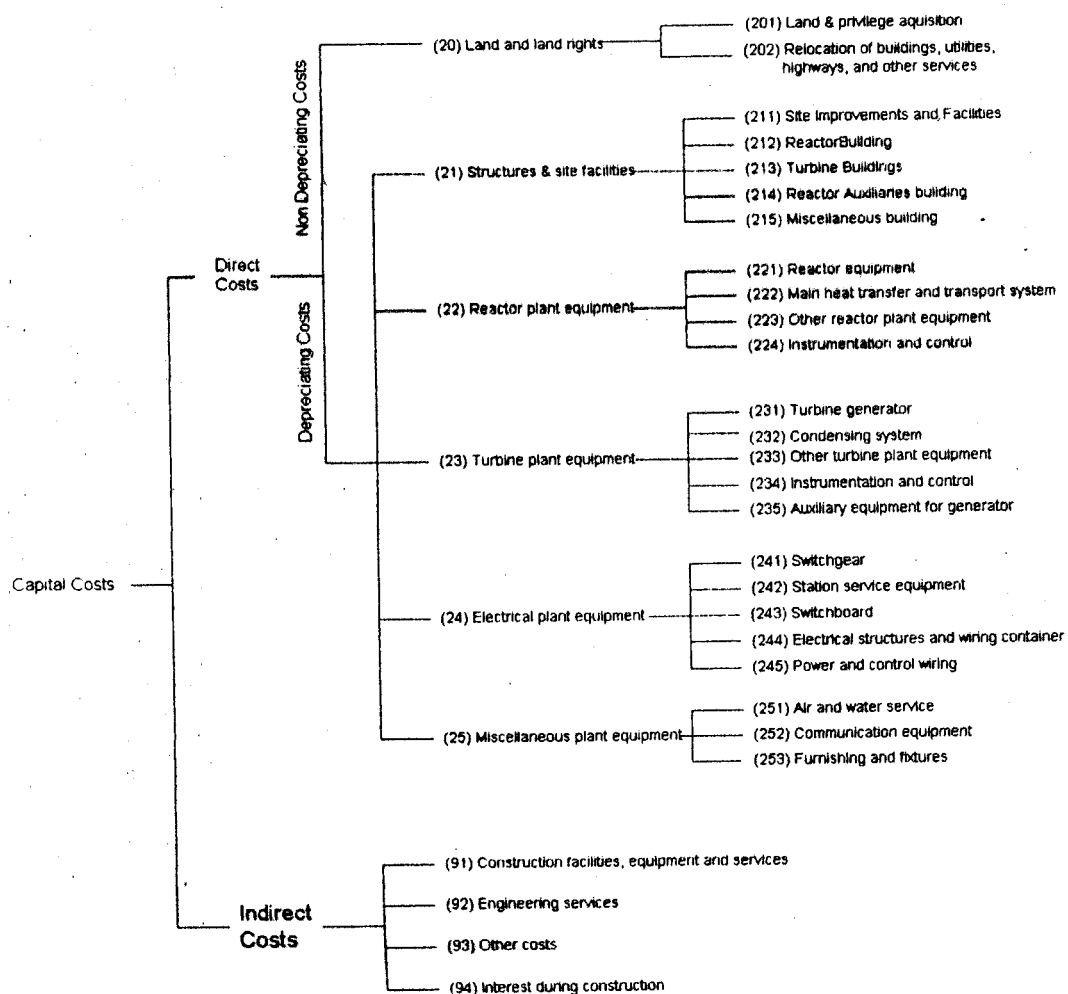
<sup>21)</sup> Erwin Siregar, Prospek Gas Bumi Sebagai Bahan Bakar Pembangkit Listrik, Makalah Hasil Lokakarya Energi, KNI-WEC, Jakarta, 1993, hal. 786

<sup>22)</sup> William B. Briggs, *op.cit*, hal. 2531.

untuk biaya langsung dapat digolongkan atas dua kategori, yaitu biaya dengan penyusutan dan biaya tanpa penyusutan. Sedangkan biaya tak langsung meliputi jasa profesional, biaya perawatan gedung dan sarana penunjang, bunga selama pembangunan dan biaya tak terduga. Tabel 4.4 menunjukkan secara lengkap struktur biaya modal pada pembangkit listrik tenaga fusi nuklir.

TABEL 4.4 <sup>23)</sup>

**STRUKTUR BIAYA MODAL PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA FUSI NUKLIR**



<sup>23)</sup> M. El-Wakil, Nuclear Energy Conversion, American Nuclear Society, 2nd edition, Illinois-USA, 1982, hal. 562

Yang termasuk dalam biaya tanpa penyusutan, adalah biaya yang dikeluarkan untuk barang-barang yang tidak mengalami penurunan nilai, misalnya lahan yang digunakan untuk pembangkit tenaga listrik. Sedangkan yang termasuk di dalam biaya dengan penyusutan antara lain bangunan dan sarana pendukung, peralatan reaktor, peralatan turbin, peralatan dalam sistem tenaga listrik dan peralatan penunjang lainnya.

Biaya yang tergolong dalam bangunan dan sarana pendukung antara lain biaya yang dipakai untuk mempersiapkan lahan, misalnya perataan tanah, selain itu juga termasuk biaya pembangunan gedung reaktor, pembangunan gedung turbin dan biaya pembangunan gedung penunjang lainnya.

Pengeluaran yang termasuk dalam peralatan reaktor antara lain reaktor itu sendiri ( tanpa bahan bakar ), sistem pemindah panas, sistem pengontrol reaktor dan lain sebagainya.

Dalam perhitungan biaya modal ( *capital cost* ), tingkat suku bunga ( *discount rate* ) di Indonesia ditetapkan sebesar 12 %. Unsur biaya modal dihitung dengan rumus

$$CC = \frac{f_s \cdot P_s}{m \cdot T_o} \quad (4.7)$$

dimana  $m$  adalah faktor manfaat,  $f_s$  adalah faktor pengembalian modal dan  $T_o$  adalah jam kalender dalam 1 tahun ( = 8760 hours / year ). Berdasar data yang ada pada tabel 4.3, besar pengembalian modal (  $f_s$  ) untuk pembangkit fusi nuklir dapat dicari dengan menggunakan persamaan 4.2.

$$f_s = \frac{0,12 (1 + 0,12)^{25}}{(1 + 0,12)^{25} - 1} = 0,1275$$



Dengan besar bunga selama pembangunan ( *Interest During Construction* ) sebesar 5,4 % per tahun, besar biaya modal akan diperoleh sebesar 6189,80 \$ / kW.

Dengan faktor manfaat sebesar 75 % per tahun, besar modal ( capital cost ) sebesar

$$CC = \frac{0,1275 \times 6.429,69}{0,75 \times 8.760} = 124,78 \text{ mills / kWh}$$

Hasil perhitungan besar modal untuk pembangkit yang lain terdapat pada tabel 4.5.

Pada tabel tersebut terlihat bahwa pembangkit berbahan bakar gas ( gas combined cycle ) memiliki biaya modal investasi termurah, yaitu sebesar 12,29 mills / kWh yang jauh lebih kecil daripada biaya modal PLT Fusi Nuklir ( sekitar 9,8 % ). Untuk biaya modal PLTU batubara hanya sebesar 21 % dari biaya modal PLT Fusi sedangkan untuk biaya modal PLTN hanya 48,2 % dari biaya modal PLT Fusi. Hal ini disebabkan oleh besarnya biaya teknologi peralatan fusi nuklir dibanding dengan teknologi pembangkit yang lain.

#### IV.2.2. Biaya Operasi dan Perawatan

Biaya operasi dan perawatan terdiri dari dua komponen, yaitu biaya tetap dan biaya variabel. Biaya variabel berhubungan dengan output tenaga listrik yang dihasilkan sedang biaya tetap tidak berhubungan dengan output tenaga listrik yang dihasilkan. Biaya O & M tahunan ( dinyatakan dalam US \$ / kW year ) bergantung jenis bahan bakar, kapasitas pembangkit dan teknologi yang digunakan. Sedang biaya O & M tahunan berhubungan dengan pengoperasian pembangkit dan faktor yang mempengaruhi adalah pemeliharaan dan desain pembangkit. Biaya operasi ini meliputi upah pekerja, asuransi, air dan lain-lain.

Unsur biaya O & M (  $G_s$  ) dapat ditentukan dengan persamaan 4.3. Besar biaya operasi dan perawatan tiap tahun pada pembangkit fusi nuklir berdasar tabel adalah 32,40 \$/kW, jadi besar biaya operasi dan perawatan diperoleh sebesar

$$G_s = \frac{32,40}{8.670 \times 0,75} = 4,93 \text{ mills / kWh}$$

Besar biaya operasi dan perawatan jenis pembangkit yang lain ditunjukkan pada tabel 4.5. Dari tabel tersebut tampak bahwa biaya operasi & perawatan Gas Combined Cycle paling rendah diikuti PLTU Batubara, PLTN dan yang paling tinggi adalah biaya operasi dan perawatan PLT Fusi. Tingginya biaya operasi dan perawatan PLT Fusi disebabkan oleh karena dibutuhkan perawatan ekstra terhadap peralatan pembangkit, seperti diperlukan biaya perbaikan atau pergantian dinding reaktor secara berkala yang aus akibat tingginya temperatur dan benturan neutron berenergi tinggi..

#### IV.2.3. Biaya Bahan Bakar

Biaya bahan bakar ( dalam mills / kWh ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut

$$F_c = \frac{860 U_i}{\eta} \quad (4.8)$$

dimana  $U_i$  = Harga bahan bakar ( \$ / satuan energi )

dan  $\eta$  = Efisiensi thermal pembangkit ( % )

Harga bahan bakar serta besar biaya bahan bakar tiga jenis pembangkit dapat dilihat pada tabel 4.5. Dari hasil perhitungan tampak bahwa biaya bahan bakar PLT Fusi

jauh lebih rendah daripada pembangkit yang lain yaitu hanya sebesar 7,9 % dari biaya bahan bakar PLTN. Hal ini disebabkan oleh karena jauh lebih rendahnya harga bahan bakar fusi, yaitu dalam hal ini deuterium dan tritium, serta tingginya efisiensi thermal pembangkit fusi nuklir jika dibanding dengan pembangkit lainnya.

#### **IV.2.4. Biaya Pembangkitan Total Dari Sistem Pembangkit Fusi Nuklir dan Pembangkit Lainnya**

Biaya pembangkitan total adalah jumlah dari biaya modal, biaya operasi dan perawatan dan biaya bahan bakar. Perbandingan biaya pembangkitan total dari PLTU batubara, Gas Combined Cycle, PLTN dan PLT Fusi disajikan pada tabel 4.5 dan gambar 4.2.

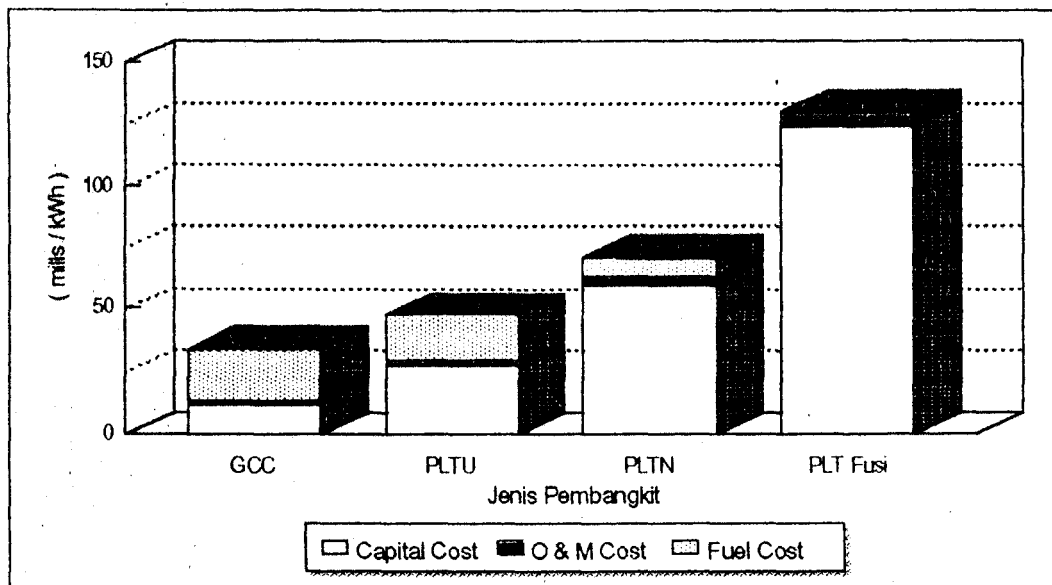
Dari tabel tersebut terlihat bahwa biaya pembangkitan total PLT Fusi jauh lebih mahal daripada PLTN, PLTU batubara maupun Gas Combined Cycle. Besar biaya pembangkitan PLT Fusi sebesar 130,30 mills / kWh adalah 1,8 kali biaya pembangkitan PLTN, 274 % biaya pembangkitan PLTU Batubara dan 3,9 kali harga energi pembangkit gas combined cycle. Tingginya harga energi listrik PLT Fusi disebabkan oleh karena biaya modal dan biaya operasi perawatan PLT Fusi yang lebih besar daripada pembangkit lainnya.

TABEL 4.5

## PERBANDINGAN BIAYA PEMBANGKITAN TOTAL DARI BEBERAPA JENIS PEMBANGKIT

( NILAI UANG TAHUN 1989 )

		G C C 2 x 300 MW	PLTU Batubara 4 x 400 MW	PLT Fissi Nuklir 2 x 938 MW	PLT Fusi Nuklir 2 x 938 MW
Biaya Modal	( mills / kWh )	12,99	27,58	60,09	124,78
Biaya Bahan Bakar	( mills / kWh )	20,56	18,16	7,47	0,59
Biaya O & M	( mills / kWh )	0,97	1,86	3,33	4,93
Total Biaya Pembangkitan	( mills / kWh )	33,82	47,60	70,89	130,30
Biaya Tahunan :					
- Biaya modal per tahun	( \$ / kW . year )	91,83	172,97	368,49	819,79
- Biaya O & M per tahun	( \$ / kW . year )	7,27	11,64	20,40	32,40
Referensi :					
- Biaya dasar	( \$ / kW )	585,30	890,70	2.000,00	3.800,00
- Bunga selama konstruksi	( \$ / kW )	100,03	465,90	890,11	2.629,69
- Waktu konstruksi	( Tahun )	8	8	7	10
- Biaya Modal Investasi Total	( \$ / kW )	685,33	1356,6	2.890,11	6.429,69
- Umur Ekonomis	( Tahun )	20	25	25	25
- Faktor Manfaat	( % )	85,3	71,6	70	75
- Discount Rate	( % / Tahun )	12	12	12	12
- Faktor Pengembalian Modal		0,134	0,1275	0,1275	0,1275
- Jenis Bahan Bakar		Gas Alam	Batubara	Uranium Thorium	deuterium tritium
- Harga Bahan Bakar	( mills / Mcal )	10,04	7,18	2,78	0,000413
- Efisiensi Panas	( % )	42	34,0	70	60,0



GAMBAR 4.2

PERBANDINGAN BIAYA PEMBANGKITAN TOTAL  
DARI BEBERAPA PEMBANGKIT  
(NILAI UANG TAHUN 1989)

Tingginya total biaya pembangkitan atau harga energi listrik PLT Fusi menunjukkan bahwa pemakaian pembangkit fusi nuklir adalah tidak ekonomis jika dibanding dengan pembangkit jenis lainnya. Pada bagian berikut akan diberikan dua kondisi yang membuat nilai ekonomis PLT Fusi dapat bersaing dengan pembangkit lainnya.

#### 1. Berubahnya Suku Bunga

Besar biaya pembangkitan total PLT Fusi disebabkan oleh sangat tingginya biaya modal pembangkit tiap energi output. Dengan besarnya capital cost yang diperlukan bagi pembangkit listrik dengan teknologi fusi nuklir, maka daya saing nilai ekonomi sangat sensitif terhadap faktor-faktor yang terkait bagi proyek

investasi tinggi umumnya, yaitu antara lain waktu yang diperlukan untuk pembangunan, bunga pinjaman dan lain sebagainya.

Pada bagian ini akan dilakukan analisa ekonomi terhadap pembangkit fusi nuklir dengan discount rate yang berbeda-beda, yaitu 4 % dan 8 %, sedang parameter-parameter yang lain adalah tetap. Dengan discount rate sebesar 8 %, faktor pengembalian modal adalah sebesar

$$f_s = \frac{0,08 (1 + 0,08)^{25}}{(1 + 0,08)^{25} - 1} = 0,094$$

sehingga besar capital cost menjadi

$$CC = \frac{0,094 \times 6.429,69}{0,75 \times 8.760} = 91,99 \text{ mills / kWh}$$

Biaya bahan bakar dan biaya operasi dan perawatan tidak terpengaruh oleh perubahan discount rate yang diterapkan. Jadi besar biaya pembangkitan total PLT Fusi pada discount rate = 8 % adalah

$$kl = \text{Capital Cost} + \text{O \& M Cost} + \text{Fuel Cost}$$

$$= 91,99 + 4,93 + 0,59 = 97,51 \text{ mills / kWh}$$

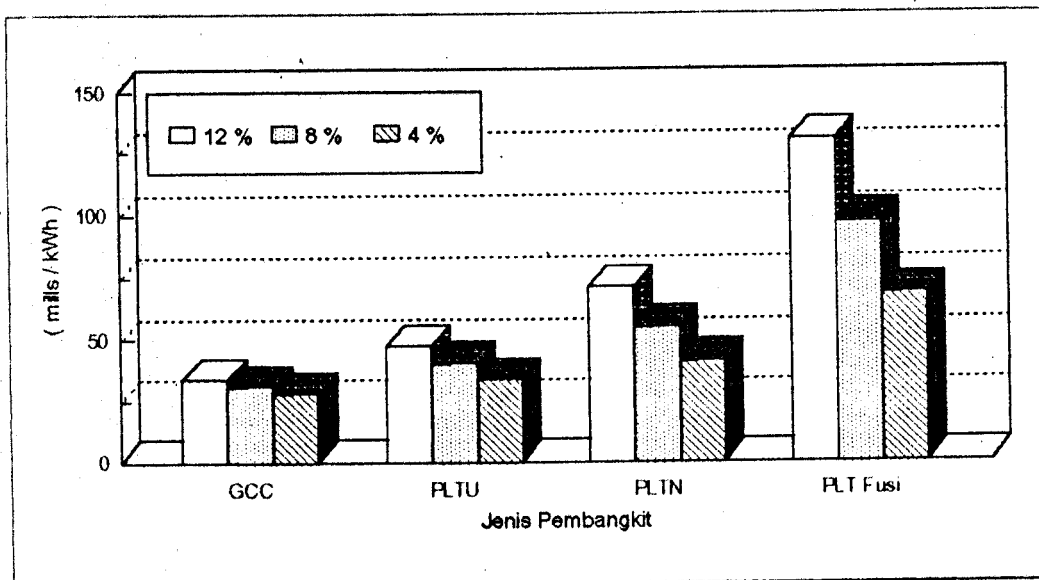
Hasil perhitungan biaya total pembangkitan PLT Fusi dan pembangkit lainnya dengan discount rate 4 % dan 8 %, dapat dilihat pada tabel 4.6 dan gambar 4.3.

TABEL 4.6

PERBANDINGAN BIAYA PEMBANGKITAN TOTAL BEBERAPA  
PEMBANGKIT DENGAN DISCOUNT RATE YANG BERBEDA

( mills / kWh )

Disc. Rate	JENIS PEMBANGKIT			
	GCC	PLTU Batubara	PLTN	PLT Fusi
12 %	33,82	47,60	70,89	130,30
8 %	30,87	40,28	54,95	97,20
4 %	28,28	33,87	40,97	68,16



GAMBAR 4.3

PERBANDINGAN BIAYA PEMBANGKITAN  
DENGAN DISCOUNT RATE BERBEDA-BEDA

Dari tabel 4.6 , terlihat bahwa nilai ekonomis PLT Fusi dapat bersaing dengan pembangkit lainnya bila ditetapkan discount rate sebesar 4 %. Pada kondisi ini, harga energi listrik fusi nuklir menjadi 68,16 mills / kWh yang lebih rendah daripada harga energi PLTN dengan discount rate 12 %.

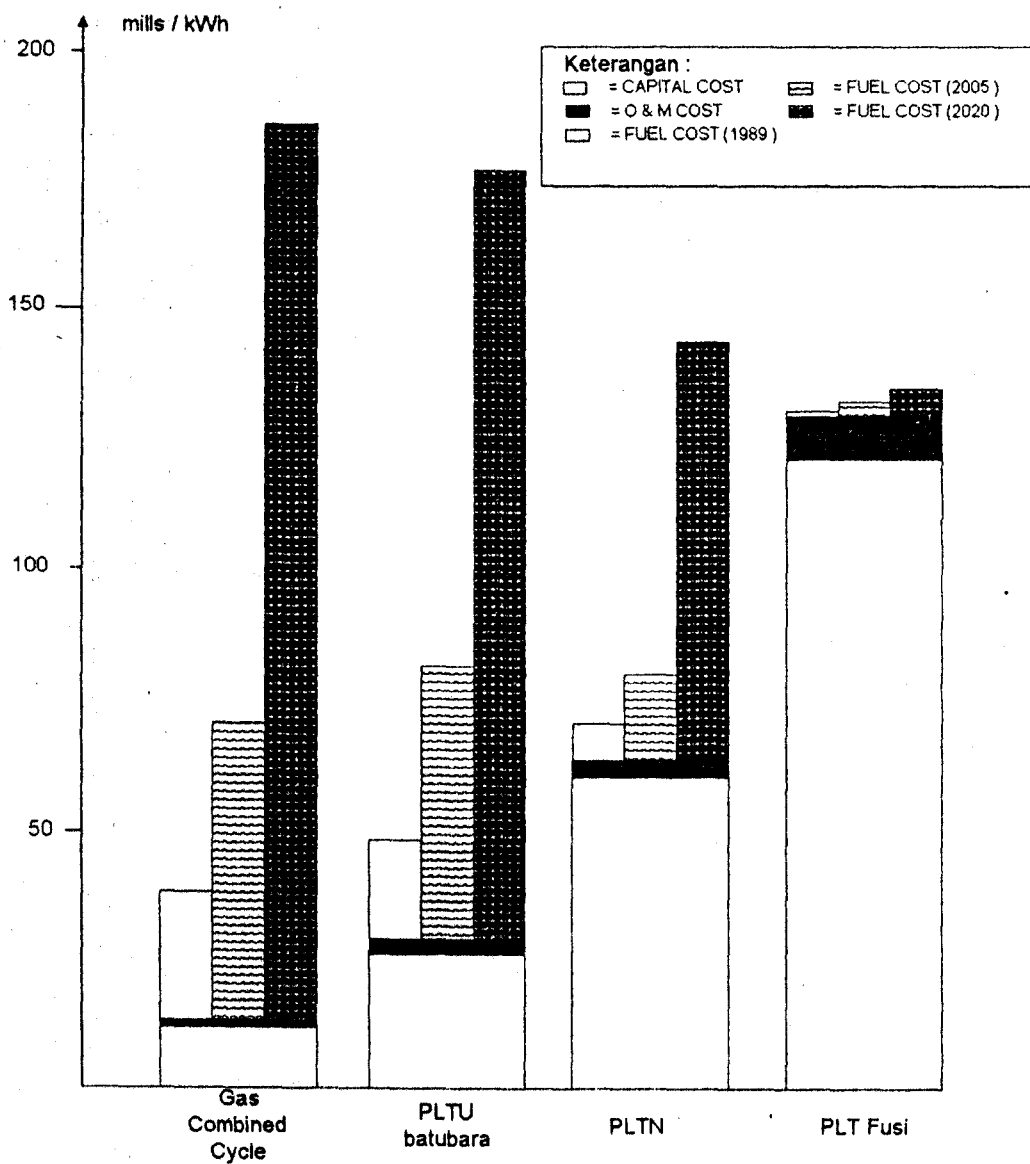
## 2. Kenaikan Harga Bahan Bakar

Tidak seperti pembangkit tenaga listrik pada umumnya, harga energi listrik atau biaya pembangkitan dari PLT dengan teknologi Fusi tidak terpengaruh oleh kenaikan harga bahan bakar. Hal ini disebabkan oleh karena rendahnya harga bahan bakar fusi nuklir dan tingginya efisiensi thermal daipada pembangkit.

Dalam analisa berikut akan diasumsikan terjadi kenaikan harga bahan bakar pembangkit sebesar 7 % tiap tahun. Pada tahun 2020, biaya pembangkitan total PLT Fusi Nuklir meningkat menjadi 134,52 mills / kWh, sedangkan biaya pembangkitan pambangkit berbahan bakar gas mnejadi 180,72 mills / kWh. Perbandingan biaya pembangkitan dari berbagai jenis pembangkit akibat terjadinya kenaikan harga, disajikan pada gambar 4.4.

Jadi pembangkit listrik dengan teknologi fusi nuklir akan memiliki nilai ekonomis yang dapat bersaing dengan pembangkit lain bila diberlakukan discount rate yang rendah dan terjadinya kenaikan harga bahan bakar pembangkit.





GAMBAR 4.4

PERBANDINGAN BIAYA PEMBANGKITAN TOTAL BERBAGAI PEMBANGKIT  
AKIBAT KENAIKAN HARGA BAHAN BAKAR

### IV.3. DAMPAK LINGKUNGAN PENERAPAN TEKNOLOGI FUSI NUKLIR UNTUK PUSAT PEMBANGKIT

Masalah lingkungan saat ini sudah menjadi masalah yang serius dan menjadi faktor penentu dalam pemilihan teknologi pembangkit yang akan dikembangkan pada masa mendatang.

Pemanfaatan batubara sebagai bahan bakar pembangkit di Indonesia dalam usaha untuk pemenuhan energi yang berkelanjutan akan diperbesar. Indikasi ini akan memberi dampak yang buruk terhadap lingkungan.

Dampak lingkungan yang timbul akibat penggunaan PLTU batubara adalah adanya polusi udara akibat emisi gas  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  dan abu atau debu yang beterbangan. Limbah abu sisa pembakaran yang betumpuk di lapangan terbuka akan menimbulkan masalah lingkungan yang tidak bisa diabaikan.

Dengan adanya emisi  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$ , maka potensi hujan asam yang ada pada awan lokal bisa diterbangkan angin ke berbagai arah. Sehingga dapat menyebarkan efek hujan asam tidak hanya pada sekitar lokasi PLTU, namun dapat meluas ke beberapa wilayah, bahkan melampaui perbatasan sebuah negara. Contoh kasus pembakaran batubara di negara-negara Eropa.

Penambahan emisi  $\text{CO}_2$  akan mengurangi kadar lapisan ozon di angkasa sehingga menimbulkan efek rumah kaca dan penyakit kanker kulit. Timbulnya pemanasan global bumi akan mempengaruhi cuaca global yang serius, seperti yang dikhawatirkan oleh para ahli lingkungan.

Polusi udara mempunyai dampak yang negatif terhadap tanah, antara lain keasaman tanah, yaitu deposisi belerang dan nitrogen pada permukaan tanah akan merubah keasaman tanah serta terserapnya logam-logam berat ke dalam tanah akan mengakibatkan kontaminasi pada tanah dan merusak air tanah.

Berdasar hasil studi Markal tahun 1992<sup>24)</sup>, keadaan tanah di pulau Jawa adalah terjadinya daerah kritis terhadap keasaman seluas 14 % dari luas pulau Jawa dan yang terbesar adalah di propinsi Jawa Barat. Setelah tahun 2021, tingkat polusi penyebab keasaman ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ) akan melebihi kapasitas penyangga, hal ini menyebabkan tanah yang tidak terlalu kritis (46 %) akan menjadi kritis untuk keasaman tanah. Sekitar 27 % dari pulau Jawa pada saat ini, air tanahnya diperkirakan terkontaminasi oleh logam-logam berat.

Gangguan akibat pencemaran udara pada kesehatan manusia sangat bervariasi tergantung dari jenis polutan. Polutan utama yang mengganggu kesehatan manusia akibat pemakaian bahan bakar batubara adalah  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  dan partikel debu. Konsentrasi  $\text{SO}_x$  sebesar  $1500 \mu\text{g} / \text{m}^3$  stasioner dalam 24 jam dapat menimbulkan kematian, konsentrasi  $115 \mu\text{g} / \text{m}^3$  (rata-rata dalam setahun) atau konsentrasi  $300 \mu\text{g} / \text{m}^3$  dalam 24 jam, akan berakibat buruk terhadap kesehatan. Gangguan tersebut berupa iritasi mata atau saluran pernafasan, pandangan kabur dan gejala penyakit jantung. Konsentrasi  $\text{NO}_x$  sebesar  $177 - 205 \mu\text{g} / \text{m}^3$  dalam waktu paparan 2 sampai 3 tahun dapat menyebabkan bronchitis gawat. Konsentrasi  $162 \mu\text{g} / \text{m}^3$  dengan waktu paparan 30 menit dapat menimbulkan bisul-bisul berair

---

<sup>24)</sup> Nengah Sudja, Dr. Ing., op.cit, hal. 52

pada paru-paru. Sedangkan adanya debu akan mengendap di paru-paru dan menimbulkan berbagai saluran pernafasan.

Khusus dalam membicarakan dampak lingkungan dari penggunaan PLTN sebagai pembangkit listrik di Indonesia akan lebih tepat bila dipisahkan antara dampak lingkungan dengan resiko. Dampak untuk membicarakan yang pasti terjadi sedang resiko dipakai untuk membicarakan akibat yang mungkin terjadi.

Dalam kondisi operasi normal, radiasi nuklir meskipun dalam jumlah yang sangat rendah bial berlangsung dalam waktu yang panjang dapat mempengaruhi ekosistem di sekitar reaktor. Masalah limbah radioaktif, terutama dari sisa bahan bakar nuklir menuntut perhatian yang serius. Karena limbah nuklir ini memiliki daya radiasi yang sama dengan bahan bakar nuklir semula dalam jangka waktu yang sangat lama ( dalam orde puluhan hingga ratusan bahkan ribuan tahun ).

Bila telah sampai pada usia ekonomisnya, hingga saat ini instalasi PLTN tersebut harus dilakukan *decomissioning*. Hal ini bukan merupakan tindakan penutupan instalasi pembangkit biasa, seperti pada PLTU dan pembangkit lainnya, namun harus dilakukan usaha pengamanan supaya radiasi nuklir yang telah ada pada instalasi tersebut diisolasi dengan aman. Menurut perhitungan para ahli, kegiatan ini dapat menghabiskan biaya lebih dari 35 % dari seluruh biaya pembangunan PLTN.

Dampak lingkungan dari penggunaan teknologi fusi nuklir untuk pusat pembangkit adalah digunakannya lahan yang cukup luas untuk lokasi pusat

pembangkit listrik. Hal ini dapat mempengaruhi ekosistem lingkungan sekitar dan tatanan sosial, ekonomi maupun budaya masyarakat yang tinggal di sekitar lokasi.

Tingginya kegiatan konstruksi disamping menguntungkan penduduk setempat ( yang tertampung sebagai buruh kasar bangunan atau kegiatan yang lain ) juga menimbulkan dampak negatif terhadap kemapanan tatanan sosial, budaya maupun ekonomi mereka. Mengingat tingginya teknologi yang diperlukan dalam pembangunan pembangkit listrik tenaga fusi nuklir, maka keterlibatan masyarakat lokal tidak akan cukup lama. Yang pada gilirannya dapat menimbulkan kesenjangan sosial.

Pengambilan air dari lingkungan sekitar guna diproses menjadi bahan bakar deuterium juga dapat menimbulkan gangguan bagi ekosistem yang ada di sekitar lokasi.

Kelebihan pembangkit fusi nuklir dibanding pembangkit lain adalah tidak dihasilkannya emisi gas polusi udara seperti yang ditimbulkan oleh pembangkit berbahan bakar fosil dan tidak adanya limbah radioaktif yang dihasilkan seperti pada pembangkit fisi nuklir serta rendahnya polusi panas yang dihasilkan jika dibandingkan dengan pembangkit jenis lainnya.

Tingginya efisiensi panas pembangkit fusi nuklir ( mencapai 60 % ), menyebabkan polusi panas yang dibuang ke lingkungan sekitar lebih rendah daripada pembangkit jenis lain. Bahan yang bersifat radioaktif pada proses fusi adalah tritium dan neutron. Keberadaan tritium akan menjadi bahan bakar pada proses fusi selanjutnya sedangkan neutron akan segera melebur dalam hidrogen.

Dengan demikian dapat dikatakan bahwa PLT Fusi tidak menghasilkan limbah radioaktif yang berbahaya bagi lingkungan.

Dari analisa di atas, dapat dikatakan bahwa pembangkit fusi nuklir adalah pembangkit listrik yang lebih bersahabat dengan lingkungan jika dibandingkan dengan pembangkit jenis lain. Oleh karena itu, pembangkit listrik fusi nuklir dapat dijadikan sebagai pembangkit yang ideal untuk digunakan di masa mendatang.

# BAB V

## PENUTUP

### V.1. KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan tentang studi penerapan teknologi fusi nuklir untuk pusat pembangkit di Indonesia, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Teknologi fusi nuklir yang diterapkan untuk pusat pembangkit tenaga listrik merupakan suatu sistem pembangkit yang secara teknologi maupun dampak terhadap lingkungan lebih baik dibandingkan dengan pembangkit dengan bahan bakar fosil dan pembangkit fisi nuklir.
2. Dari beberapa jenis reaktor fusi nuklir yang ada, reaksi D-T merupakan reaksi yang paling menguntungkan bila digunakan pada pembangkit tenaga listrik, karena reaksi D-T memiliki energi ambang yang paling rendah sebesar 10 keV dan penguatan energi maksimum yang dimiliki sebesar 1800 kali.
3. Ditinjau dari biaya bahan bakar, penggunaan pembangkit listrik fusi nuklir adalah sangat menguntungkan. Namun karena PLT Fusi membutuhkan investasi yang besar yaitu 7 kali lipat dari investasi gas combined cycle dan 4 kali serta hampir 200 % dari investasi PLTN, maka daya saing ekonomi sangat sensitif terhadap faktor-faktor yang terkait pada proyek investasi

tinggi umumnya yaitu waktu yang diperlukan untuk pembangunan, bunga pinjaman dan lain sebagainya.

4. Dari analisa ekonomi dalam biaya pembangkitan, dengan biaya pembangkitan sebesar 8,5 kali biaya pembangkitan PLTU batubara dan 203% biaya pembangkitan PLTN, sistem pembangkit tenaga listrik dengan teknologi fusi nuklir belum ekonomis bila digunakan pada masa sekarang ini.
5. Nilai ekonomis pembangkit tenaga fusi baru dapat bersaing bila dikenakan discount rate sebesar 4 % atau terjadi kenaikan harga bahan bakar pembangkit.
6. Pembangkit listrik tenaga fusi mempunyai sifat yang lebih baik terhadap lingkungan sekitarnya jika dibandingkan dengan pembangkit jenis lain. Kelebihan PLT fusi dibanding pembangkit lain adalah tidak menimbulkan gas emisi yang menyebabkan polusi udara seperti  $SO_x$  dan  $NO_x$  , tidak adanya limbah radioaktif pada prosesnya.
7. Penggunaan energi fusi nuklir sebagai energi alternatif pengganti energi fosil untuk pusat pembangkit di masa mendatang merupakan langkah yang tepat karena semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil serta mengingat dampak lingkungan yang ditimbulkan dari penggunaan energi fosil secara besar-besaran. Akan tetapi perlu juga diikuti dengan penguasaan teknologi fusi nuklir yang tengah dikembangkan pada masa sekarang ini.



Dengan penerapan teknologi fusi nuklir yang merupakan teknologi bersih lingkungan pada masa yang akan datang, diharapkan kebutuhan energi di Indonesia dapat terpenuhi tanpa adanya pencemaran yang membahayakan lingkungan sekitar.

## V.2. SARAN - SARAN

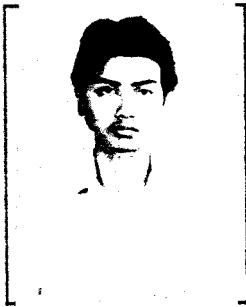
1. Mengingat tingkat kebutuhan akan energi di Indonesia terpusat di pulau Jawa dimana tingkat kepadatannya sangat tinggi dengan luas hanya 8 % dari keseluruhan wilayah daratan Indonesia, maka pertimbangan dalam aspek lingkungan harus lebih diperhatikan untuk mencegah terjadinya tingkat pencemaran yang tinggi.
2. Karena teknologi fusi nuklir merupakan teknologi masa depan, perlu kiranya disiapkan program nasional dalam aspek sosial, budaya, pendidikan dan industri untuk mengikuti perkembangan teknologi fusi nuklir yang tengah berkembang dengan pesat pada masa dewasa ini agar pembangunan pembangkit fusi nuklir dapat dilaksanakan tepat pada waktunya untuk pemenuhan energi di masa mendatang.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Abdul Kadir, Prof. Ir., " Energi ", UI - Press, Jakarta, 1990
2. Arthur Beiser, " Concept of Modern Physics ", 4th Edition, McGraw-Hill Int., 1988
3. Clarke, John F., World Progress Toward Fusion Energy, World Energy Conference, Montreal-Canada, 1989
4. DeBellis R.J. and Z. A. Sabri, " Fusion Power ", Electrical Power research Institute, EPRI, 1977
5. Departemen Pertambangan dan Energi, " Repelita VI ", DPE, 1994
6. Gibbs and Hill, " Economics Comparison of Coal and Nuclear Electric Power Generation ", Gibbs & Hill Inc., 1980
7. Hans Wolfgang Levi, Prof., Thomas H. Pigford, Prof., and Manson Benedict, Prof., " Nuclear Chemical Engineering ", McGraw-Hill, 1981
8. Japan atomic Energy Research Institute, " Jaeri Tokamak-60 ", JAERI-Japan, 1986
9. M. El-Wakil, Dr., " Nuclear Energy Conversion ", American Nuclear Society, 2nd edition, Illinois-USA, 1982

10. M. Saleh Karim, Ir., Sriyana, Ir., " Penerapan Teknologi Nuklir Dalam Memenuhi Kebutuhan Energi Listrik Yang Berwawasan Lingkungan ", Makalah Lokakarya Energi, Jakarta, 1994
11. Milan Kozak, Stanislav Havel, " Performance Of Nuclear Power Plants and Analysis of Some Factors Affecting Their Operational Reliability and Economy ", 14th Congress of the World Energy Conference, Montreal-Cannada, 1989
12. Manfred Leiser, Ph.D., Vladimir Demchenko, Dr. Sc., " Nuclear Fusion - Inexhaustible Source of Energy For Tomorrow ", 14th Congress of the World Energy Conference, Montreal-Cannada, 1989
13. Nengah Sudja, Dr. Ing., " Keadaan Kelistrikan di Indonesia dan Permasalahannya ", Makalah Lokakarya Energi, Jakarta, 1990
14. P.L. Coutrier, " Kebijakan Dalam Penggunaan Energi Yang Berwawasan Lingkungan ", Makalah Lokakarya Energi - KNI WEC, Jakarta, 1994
15. Rinaldi, Dr. Ir., Rudy S., Dr., Uno B S., Dr. Ir., " Prospek Penggunaan Teknologi Untuk Pembangkit Tenaga Listrik ", Makalah Seminar Dies Natalis Universitas Indonesia, 1993
16. Ronald Allen Knief, " Nuclear Energy Technology ", McGraw-Hill, 1981
17. William B. Briggs, " The Future of Fusion Power Comes into Focus ", 14th Congress of the World Energy Conference, Montreal-Cannada, 1989

## BIO DATA



Penulis dilahirkan di Surabaya pada tanggal 30 April 1970 dengan nama MULJO PRASETYO. Penulis merupakan anak terakhir dari lima bersaudara dari orang tua yang bernama TJIPTO KARIOEOEPONO dan MOERJANI MOEHIMAN.

Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember - ITS Surabaya dengan nomor pokok 2882201119.

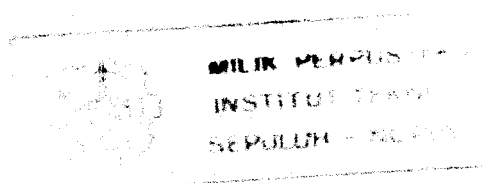
Riwayat pendidikan penulis adalah sebagai berikut :

Tahun 1982, lulus SDN Pucang Jajar I, Surabaya

Tahun 1985, lulus SMP Kristen PETRA 3 - Manyar, Surabaya

Tahun 1988, lulus SMA Kristen PETRA 2 - Manyar, Surabaya

Tahun 1988, masuk Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.



20 JUN 1994

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO - FTI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA

EE 1799 TUGAS AKHIR - 6 SKS

Nama Mahasiswa : Mulyo Prasetyo  
No. Pokok : 2882201119  
Bidang Studi : Teknik Sistem Tenaga  
Tugas diberikan : Semester Genap 1993/1994  
Tugas diselesaikan : -  
Dosen Pembimbing : Ir. Syariffuddin M. M.Eng  
Judul Tugas Akhir :

**STUDI PENGGUNAAN TEKNOLOGI FUSI NUKLIR DENGAN REAKSI DT DAN DD DARI AIR LAUT DAN KEMUNGKINAN PENERAPANNYA DI INDONESIA**

*Uraian Tugas Akhir :*

Perekonomian Nasional yang semakin maju memerlukan penyediaan tenaga listrik yang semakin meningkat. Sedang di sisi lain peningkatan penyediaan tenaga listrik belum mampu mengimbangi pertumbuhan yang pesat tersebut.

Guna memenuhi kebutuhan energi listrik yang terus meningkat, perlu diusahakan perencanaan yang optimal dalam pengembangan sumber daya energi alternatif pada sistem pembangkitan tenaga listrik untuk masa yang akan datang.

Teknologi fusi nuklir memiliki potensi yang cukup besar sebagai sumber energi alternatif pada sistem pembangkit di masa mendatang. Dengan menggunakan air laut sebagai sumber Dt dan Dd dalam proses fusi nuklir, akan kita peroleh sistem pembangkit tenaga listrik yang berdampak lebih positif terhadap lingkungan dan relatif lebih ekonomis.

Mengetahui

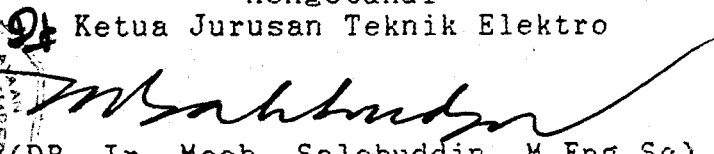
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Koordinator

Dosen Pembimbing

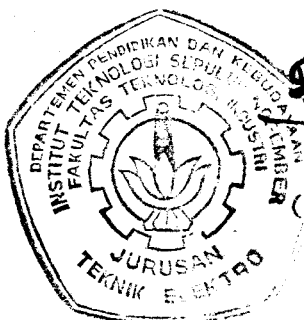
(Ir. Sidarjanto)  
NIP. 130532003

(Ir. Syariffuddin M. M.Eng)  
NIP. 130520749

Mengetahui

 Ketua Jurusan Teknik Elektro

(DR. Ir. Moch. Salehuddin, M.Eng.Sc)  
NIP. 130532026



MILIK PUSKAS  
INSTITUT TEKNOLOGI  
SEPULUH - NOPEMBER

## USULAN TUGAS AKHIR

---

- A. JUDUL TUGAS AKHIR :  
STUDI PENGGUNAAN TEKNOLOGI FUSI  
NUKLIR DENGAN REAKSI DT DAN DD  
DARI AIR LAUT DAN KEMUNGKINAN  
PENERAPANNYA DI INDONESIA
- B. RUANG LINGKUP :  
Materi perkuliahan yang menunjang  
Tugas Akhir ini adalah :  
- Pembangkitan Tenaga Listrik  
- Dasar Konversi Energi  
- Manajemen Industri
- C. LATAR BELAKANG :  
Pertumbuhan ekonomi Indonesia  
yang cukup tinggi dewasa ini,  
memacu peningkatan kebutuhan  
listrik. Sedang peningkatan  
penyediaan tenaga listrik belum  
mampu mengimbangi pertumbuhan  
tersebut. Oleh karena itu  
diperlukan perencanaan yang  
optimal dalam pengembangan sumber  
daya energi bagi sistem  
pembangkit untuk masa mendatang.  
Penerapan teknologi fusi nuklir  
dengan reaksi Dt dan Dd dari air  
laut pada sistem pembangkit,  
merupakan jawaban pemenuhan  
kebutuhan listrik yang berdampak  
lebih positif terhadap lingkungan  
dan realtif lebih ekonomis.
- D. PENELAAHAN STUDI :  
- Mempelajari literatur yang  
berhubungan dengan fusi nuklir  
serta proses reaksi Dt dan Dd  
dari air laut  
- Mempelajari pemanfaatan tekno-  
logi fusi nuklir pada pembang-  
kit tenaga listrik  
- Mempelajari keandalan sistem  
pembangkit dengan fusi nuklir  
- Mempelajari kemungkinan pene-  
rapannya di Indonesia

E. TUJUAN :

Mengetahui aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan dalam penerapan teknologi fusi nuklir dari air laut di Indonesia

F. LANGKAH-LANGKAH :

- Studi literatur
- Pengumpulan data
- Analisa data
- Penulisan naskah

G. JADWAL KEGIATAN :

JENIS KEGIATAN	B U L A N					
	I	II	III	IV	V	VI
Studi Literatur						
Pengumpulan Data						
Analisa Data						
Penyusunan Naskah						

H. RELEVANSI :

Dengan menerapkan teknologi fusi nuklir dengan reaksi  $Dt$  dan  $Dd$  dari air laut pada pusat pembangkit (PLTN) akan diperoleh manfaat yang besar dimana sistem pembangkitan lebih berdampak positif terhadap lingkungan dan relatif lebih ekonomis.